

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

IMPACT DES TYPES DE FLOCONS DE NEIGE EN ALTITUDE SUR LES
PRÉCIPITATIONS À LA SURFACE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

HOUSSEYNI SANKARÉ

AOÛT 2015

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord ma directrice de recherche, la professeure Julie M. Thériault, pour son soutien, ses idées, ses commentaires et de sa disponibilité constante sans lesquels ce projet n'aurait certes pas abouti. Un grand merci aux professeurs René Laprise et Éric Girard pour avoir accepté d'évaluer ce document et ainsi apporter des commentaires pertinents qui ont contribué à son amélioration. Je remercie le Centre ESCER pour son soutien financier et tout son personnel, professeurs et employés pour le soutien de tout genre. Merci à toute l'équipe de Julie en particulier Mélissa et Dominic. Merci à mes collègues de bureau, Sétigui, Marilys, Insa et Pierre pour les bons moments passés. Merci à toute ma famille pour le soutien moral.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ACRONYMES	xi
LISTE DES SYMBOLES.....	xii
RÉSUMÉ.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CHAPITRE I	
INTRODUCTION.....	1
1.1 Conditions de formation de types de précipitations	2
1.2 Les processus de formation de types de précipitations.....	4
1.3 Techniques de prévision de types de précipitations.....	5
1.4 Paramètres influençant la fonte des flocons de neige	9
1.5 Objectif.....	11
CHAPITRE II	
DESCRIPTION DU MODÈLE DE NUAGE ET LE SCHÉMA MICROPHYSIQUE....	13
2.1 Configuration générale du modèle de nuage.....	13
2.2 Description du schéma microphysique.....	14
2.2.1 Configuration générale du schéma microphysique	14
2.2.2 Les processus microphysiques	17
2.2.3 La sédimentation	20
2.3 Paramétrage des différents types de flocons de neige	20
CHAPITRE III	
MÉTHODE EXPÉRIMENTALE	27
3.1 Les observations disponibles	27

3.2	Étude théorique systématique	30
CHAPITRE IV		
COMPARAISON DES RÉSULTATS THÉORIQUES AVEC LES OBSERVATIONS		32
4.1	Transition pluie- neige en terrain montagneux	32
4.1.1	Distribution de tailles initiale	32
4.1.2	L'évolution verticale de types de précipitations formées	34
4.1.3	Comparaison de types de précipitations à la surface	39
4.2	Profil typique associé à la formation de grésil	41
4.2.1	L'évolution verticale de types de précipitations formées	41
4.2.2	Comparaison de types de précipitations à la surface	46
CHAPITRE V		
PROFIL DE TEMPÉRATURE THÉORIQUE.....		49
5.1	Sensibilité du type de précipitation à la température maximale et à l'épaisseur de la couche chaude	50
5.2	Sensibilité à l'épaisseur de la couche chaude et la température de surface	53
5.3	Sensibilité à l'épaisseur de la couche froide et à la température maximale	55
CHAPITRE VI		
RESUMÉ ET CONCLUSIONS.....		59
6.1	Resumé	59
6.2	Conclusions.....	63
ANNEXE A		
DESCRIPTION DES OBSERVATIONS.....		66
A.1	La campagne de mesure expérience SNOW-V10	66
A.2	Les observations de CASP II	68
RÉFÉRENCES.....		70

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Profils de températures typiques pendant les tempêtes hivernales associées à un front chaud.(a) Profil favorable à la formation de la neige mouillée, de la neige presque complètement fondue et de la pluie à la surface. (b) Profil favorable à la formation du grésil et de la pluie verglaçante à la surface. Les symboles désignent : NT : niveau de transition, CC : couche chaude, NC : niveau critique et CF : couche froide.....	4
1.2 Schéma représentant une distribution de tailles d'une catégorie de précipitation, observée (rouge), représentée dans un modèle «bin» (bleue) et méthode «bulk» (noire).....	8
2.1 Diagramme schématique de la distribution de tailles des types de précipitations simulées. (a) : $T_w > 0$ °C. (b) $T_w < 0$ °C. A : désigne le diamètre minimal de la neige presque complètement fondue et du grésil respectivement en (a) et en (b). B: est le diamètre minimal du liquide avec des coquilles de glace. C : est le diamètre maximal de la neige presque complètement fondue en (a) et du grésil en (b). Les symboles de la légende sont définis dans la liste des symboles. Adopté de Thériault and Stewart (2010).....	16
2.2 Résumé des processus microphysiques et l'évolution des types de précipitations lors de la chute à travers la couche de fonte et de regel. La hauteur critique est indiquée ainsi que la température des différentes couches. Les flèches solides entre les types de précipitations indiquent un changement de variables pronostiques. Les flèches en pointillés indiquent que la précipitation a changé de nom mais garde la même variable pronostique. Les photos au dessus du diagramme indiquent les différents types de flocons de neige testés dans le schéma. De gauche à droite nous avons le type dendrite, <i>bullet</i> , colonne et <i>graupel</i> . Adapté de Thériault and Stewart (2010).....	18

2.3	Photos des types de flocons de neige : a) dendrites, b) <i>bullets</i> , c) colonnes, d) <i>graupels</i> . Adaptées de Thériault et al. (2014).....	21
2.4	Comparaison des vitesses terminales des flocons de neige et des gouttes d'eau pour les flocons dendrites, <i>bulk-snow</i> , <i>bullet</i> , colonne et <i>graupel</i> et de la pluie (V_r) en fonction du diamètre en équivalent liquide.....	23
2.5	Comparaison des vitesses terminales des flocons de neige de type dendrite <i>bulk-snow</i> , <i>bullet</i> , colonne, <i>graupel</i> en fonction de la fraction liquide.....	25
3.1	Le profil vertical de la température du thermomètre mouillé. (a) recueillie par une station météorologique installée sur la gondole du center de ski Whistler (Whistler, BC). Les mesures ont été prises vers 2300 UTC le 7 mars 2010. (b) le radiosondage obtenu à 2315 UTC le 1 ^{er} février 1992 à Saint-Jean en Terre-Neuve.....	28
3.2	Profil de température favorable à la formation du verglas et du grésil. (a) variation de la température de surface de -8 °C à -1 °C, (b) variation de la température maximale de la couche chaude de 0.5 °C à 5 °C, (c) variation de l'épaisseur de la couche chaude de 100 m à 1000 m, (d) variation de l'épaisseur de la couche froide de 100 m à 1000 m. Les températures sont variées de 0.5 °C et les épaisseurs de 100 m.....	31
4.1	Distributions de tailles initiales simulées à la station RND (1856 m) à Whistler le 7 mars 2010 au environ de 2300 UTC. Les différentes lignes en couleur correspondent aux types de flocons de neige identifiés par la légende.....	33
4.2	L'évolution verticale du contenu en masse de types de précipitations simulées pour cinq types de flocons neige : a) dendrite, b) <i>bulk-snow</i> , c) <i>bullet</i> , d) colonne, e) <i>graupel</i> et f) observation à Whistler le 7 mars 2010 à 2300 UTC environ. La hauteur de la couche chaude ($T_w > 0$ °C) est matérialisée par la ligne noire épaisse. Les symboles de la légende figurent dans la liste des symboles. Les variables marquées d'une étoile (*) sont 10 fois plus grandes que leur valeurs sur le graphique.....	34
4.3	Comparaison de l'épaisseur de la couche de transition pluie-neige observée et simulée pour différent type de flocon de neige. En a : l'observation, b : type de flocon dendrite, c : <i>bulk-snow</i> , d : <i>bullet</i> . Le modèle est initialisé avec les profils de température et d'humidité observés à Whistler.....	35

- 4.4 Distribution de tailles de types de précipitations formés à différents niveaux : de a à e, début de la couche chaude (850 m). De f à j, en surface (658 m). Les traits pointillés désignent les diamètres seuils. Les symboles de la légende sont dans la liste des symboles..... 37
- 4.5 L'évolution verticale des diamètres seuils simulés le 7 mars 2010 à Whistler pour cinq types de flocons neige : a) dendrite, b) *bulk-snow*, c) *bullet*, d) colonne, e) *graupel*. WS est le seuil entre la neige et la neige mouillée, SL* est le diamètre maximal de la neige presque complètement fondue, seuil entre la neige mouillée et de la neige presque complètement fondue et SL le seuil entre de la neige presque complètement fondue et la pluie..... 39
- 4.6 Comparaison de types de précipitations à la surface observés et simulés en fonction des types initiaux de flocon de neige. Les types de précipitations sont normalisés par rapport au taux de précipitation. En a : l'observation, b : type de flocon dendrite, c : *bulk-snow*, d : *bullet*, e : colonne, f : *graupel*. Le modèle est initialisé avec les profils de température et d'humidité observés à Whistler. Les symboles de la légende sont identifiés dans la liste des symboles..... 40
- 4.7 L'évolution verticale du contenu en masse de types de précipitations simulés pour cinq types de flocons neige à Saint John's. En a) dendrite, b) *bulk-snow*, c) *bullet*, d) colonne, e) *graupel*. Les deux lignes noirs épaisses limitent la couche chaude ($T_w > 0^\circ\text{C}$). Les symboles de la légende sont listés dans la liste des symboles. Les variables marquées d'un étoile (*) sont 10 fois plus grandes que les valeurs sur le graphique 42
- 4.8 Comparaison de l'épaisseur de la couche de transition pluie-neige simulée pour différent type de flocon de neige. En a : type de flocon dendrite, b : *bulk-snow*, c : *bullet*. Le modèle est initialisé avec les profils de température et d'humidité observés à Saint John's..... 42
- 4.9 Distribution de tailles de types de précipitations formés à différents niveaux : a, b, c, d, e, début de la couche chaude (2 km). f, g, h, i, j, au niveau critique (1.5 km), k, l, m, n, o, en surface (130 m). Les traits pointillés désignent les diamètres seuils. Les symboles sont identifiés dans la liste des symboles..... 44
- 4.10 L'évolution verticale des diamètres seuils simulés le 1^{er} février 1992 à Saint John's pour cinq types de flocons neige. : a) dendrite, b) *bulk-snow*, c) *bullet*, d) colonne, e) *graupel*. WS est le seuil entre la neige et la neige mouillée, SL* est le diamètre maximal de la neige presque

	complètement fondue, seuil entre la neige mouillée et de la neige presque complètement fondue et SL le seuil entre de la neige presque complètement fondue et la pluie.....	46
4.11	Comparaison de types de précipitations à la surface observés et simulés en fonction des types initiaux de flocon de neige. Les types de précipitations sont normalisés par rapport au taux de précipitation. En a : l'observation, b : type de flocon dendrite, c : <i>bulk-snow</i> , d : <i>bullet</i> , e : colonne, f : <i>graupel</i> . Le modèle est initialisé avec les profils de température et d'humidité observés à Saint John's. Les symboles de la légende sont définis dans la liste des symboles.....	47
5.1	Types de précipitations à la surface simulés en variant l'épaisseur de la couche chaude et la température maximale de l'inversion. Le type de flocon de neige initial est : (a) dendrite, (b) <i>bulk-snow</i> , (c) <i>bullet</i> , (d) colonne et (e) <i>graupel</i> . Chaque carré représente le type de précipitation pour un couplet d'intervalle température-épaisseur. La température de surface et l'épaisseur de la couche froide sont maintenues constantes respectivement à -6 °C et à 700 m. Les symboles de la légende sont définis dans la liste des symboles.....	52
5.2	Types de précipitations à la surface associés à une variation de l'épaisseur de la couche chaude et la température en surface. Le type de flocon de neige initial est : (a) dendrite, (b) <i>bulk-snow</i> , (c) <i>bullet</i> , (d) colonne et (e) <i>graupel</i> . Chaque carré représente le type de précipitation pour un couplet d'intervalle température-épaisseur. La température maximale de la couche chaude et l'épaisseur de la couche froide sont maintenues constantes respectivement à 1 °C et à 700 m. Les symboles sont dans la liste des symboles.....	54
5.3	Types de précipitations à la surface simulés en variant l'épaisseur de la couche froide et la température maximale de l'inversion. Le type de flocon de neige initial est: (a) dendrite, (b) <i>bulk-snow</i> , (c) <i>bullet</i> , (d) colonne et (e) <i>graupel</i> . Chaque carré représente le type de précipitation pour un couplet d'intervalle température-épaisseur. La température de surface et l'épaisseur de la couche chaude sont maintenues constantes respectivement à -6 °C et à 500 m. Les symboles sont définis dans la liste symboles.....	55
A.1	(a) L'emplacement des différentes stations météorologiques le long de la montagne de Whistler et leurs altitudes au-dessus du niveau de la mer, les sondage y compris la gondole ont été lancés à partir du point VOC au niveau du village de Whistler.(b) les profils manuels de la	

	gondole et de ski le long de la montagne, le point RND (Roundhouse station) est le sommet de la montagne où les observations de type de flocon ont été effectuées (Thériault et al. 2014).....	67
A.2	L'emplacement des différentes stations météorologiques dont les profils verticaux de température et d'humidité sont utilisées pour les simulations. Les croix rouge et bleu indiquent l'emplacement de Whistler et Saint John's respectivement.....	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Constantes de masse et de vitesse terminale pour différents types de flocons de neige (Woods et al. 2007).....	22

LISTE DES ACRONYMES

<i>BC</i>	British Colombia
<i>CASP II</i>	Canadian Atlantic Storms Program II
<i>CC</i>	Couche Chaude
<i>CF</i>	Couche Froide
<i>NC</i>	Niveau Critique
<i>NL</i>	Newfoundland
<i>NT</i>	Niveau de Transition
<i>RND</i>	Roundhouse site
<i>RR_types</i>	Types de précipitations
<i>SNOW-V10</i>	Science and Nowcasting of Olympic Weather for Vancouver 2010
<i>VOC</i>	Nesters station site

LISTE DES SYMBOLES

A_x	Coefficient de ventilation
a_x	Paramètre de la vitesse terminale de la catégorie x
a_w	Paramètre de la vitesse terminale avec un diamètre équivalent liquide
B_x	Coefficient de ventilation
b_x	Paramètre de la vitesse terminale de la catégorie x
b_w	Paramètre de la vitesse terminale avec un diamètre équivalent liquide
C	Gouttelettes de nuage
c_x	Paramètre de masse de la catégorie x
C_w	Capacitance
D	Diamètre
D_x	Diamètre de la catégorie x
d_x	Paramètre de masse de la catégorie x
F'	Facteur de ventilation pour la vitesse de chute
f	Fraction liquide
f_l	Fraction liquide seuil

I	Cristaux de glace
IP	Grésil
K_a	Conductivité thermique de l'air
LCP	Liquide avec des coquilles de glace
L_f	Chaleur latente de fusion
L_v	Chaleur latente d'évaporation
M	Mélange de grésil et de pluie verglaçante
M_p	Moment d'ordre p
m_x	Masse de la catégorie x
N	Distribution de taille
N_r	Concentration en nombre pour la pluie
N_s	Concentration en nombre de la neige
N_{sl}	Concentration en nombre pour de la neige presque complètement fondue
N_{Tx}	Concentration totale de la catégorie x
N_{ws}	Concentration en nombre pour la neige mouillée
N_x	Concentration en nombre de la catégorie x
N_{0x}	Concentration initiale de la catégorie x
Δq_s	Variation du rapport de mélange
q_x	Rapport de mélange de la catégorie x

R	Pluie
RH	humidité relative
RWS	Neige mouillée recongelée
S	Neige
SL	De la neige presque complètement fondue
SR	Neige recongelée
T	Température de l'air
T_c	Température en degré Celsius utilisée dans le schéma
T_w	Température du thermomètre mouillé
U	Vent tridimensionnel
$VENT_x$	Facteur de ventilation pondéré de la masse
V_m	Vitesse terminale de fonte
V_r	Vitesse terminale de la pluie
V_s	Vitesse terminale de la neige
V_{sl}	Vitesse terminale de la neige presque complètement fondue
V_{ws}	Vitesse terminale de la neige mouillée
V_x	Vitesse terminale de la catégorie x
WS	Neige mouillée
ZR	Pluie verglaçante

Γ	Fonction gamma
λ_x	Paramètre de pente de la catégorie x
ρ	Densité de l'air
ρ_t	Densité de l'eau
ψ	Nombre de Schmidh

RÉSUMÉ

Les précipitations hivernales peuvent avoir des conséquences majeures pour nos sociétés telles que des coupures d'électricité et perturbations du transport routier et aérien. Afin de mieux comprendre la formation de ces types de précipitations, des schémas microphysiques comprenant les processus reliés à la formation de pluie verglaçante et de grésil ont été développés. Ces schémas considèrent un type moyen de flocon neige (*bulk-snow*). Ce projet vise à évaluer l'impact du type de flocons de neige en altitude sur les précipitations atteignant la surface. Pour ce faire, un modèle de nuage à une dimension couplé à un schéma microphysique à double moment a été utilisé. On a testé 4 types de flocons de neige (dendrite, *bullet*, colonne et *graupel*) tombant dans des conditions atmosphériques variées. L'analyse des résultats a montré que l'épaisseur de la zone de transition pluie-neige est 4 fois plus grande avec les colonnes et *graupel* que pour les dendrites. La fonte complète des flocons de neige de type colonnes et *graupels* nécessite une couche d'inversion ($T_w > 0\text{ °C}$) 3 fois plus chaude (par rapport à la température maximale) et 4 fois plus épaisse que celle des dendrites. Les résultats montrent que la formation de la pluie verglaçante en surface est associée à la présence de flocons de neige moins denses en altitude (dendrites, *bullets*) et la formation de grésil en surface est associée à la présence de flocons de neige denses en altitude (colonnes, *graupels*). Pour conclure, nos résultats ont démontré que le type de flocons de neige a un impact important sur le type de précipitation en surface. Par conséquent, il est essentiel de considérer le type de flocon de neige formé en altitude pour prédire le type de précipitations à la surface dans les conditions météorologiques associées à des températures autour de 0 °C .

Mots clés : Types de précipitations, schémas microphysiques, modèle de nuage à une dimension, types de flocons de neige, ligne pluie-neige

ABSTRACT

Winter precipitation types can have major consequences on power outages and interruptions of ground and air transportations. To better understand the formation of these precipitation types, a microphysics scheme including the processes related to the formation of freezing rain and ice pellets has been developed. This microphysics scheme considers only an average of snowflake type, called bulk-snow. It is hypothesized that the type of snowflakes aloft can impact the melting rate and alter the type of precipitation formed. The goal of this study is to assess the impact of the type of snowflake aloft on the precipitation type reaching the surface. To address this, a one dimensional cloud model coupled with a bulk microphysics scheme is used. Four snowflakes types (dendrite, bullet, column and graupel) have been tested under various atmospheric conditions. The results showed that the thickness of the snow-rain transition is four times deeper when columns and graupel types fall through it compared to dendrites. For complete melting of the columns and graupel, it requires a warmer melting layer that is 3 times warmer (with respect to the maximum temperature in that layer) and 4 times thicker than that of the dendrites. The results show that the formation of freezing rain is associated with the presence of less dense snowflakes aloft (dendrites, bullet), and the formation of ice pellets is associated with the presence of dense snowflakes aloft (columns, graupel). In conclusion, our results demonstrated that the types of snowflakes have an important impact on the observed surface precipitation type. Therefore, it is essential to consider other types of snow in model to accurately predict the type of precipitation at the surface when the temperature is near 0 °C.

Keywords: Precipitations types, microphysical schemes, one dimensional cloud model, snowflakes types, rain-snow boundary

CHAPITRE I

INTRODUCTION

En hiver, les conditions météorologiques qui peuvent être les plus dévastatrices se produisent souvent lors des tempêtes hivernales associées à des températures autour de 0 °C où plusieurs types de précipitations pourraient se former. Ces différents types de précipitations peuvent causer des inconvénients majeurs pour la société. Par exemple, elles peuvent paralyser le transport routier et aérien, provoquer des coupures d'électricité des jours voire des semaines et, à une plus grande échelle temporelle, elles ont un impact sur la ressource en eau au printemps. Ces genres de tempêtes se produisent couramment au Canada (Stewart et al., 1995) et au Nord des États-Unis (Cortinas Jr et al., 2004). Parmi les types de précipitations, la pluie verglaçante peut être la plus dévastatrice. Par exemple, la tempête de verglas qui a frappé l'Est du Canada et la Nouvelle-Angleterre en janvier 1998 a été particulièrement dévastatrice. Plusieurs dizaines de millimètres de pluie verglaçante sont tombés sur l'Est de l'Ontario et le Sud-ouest du Québec entre le 4-10 janvier 1998, provoquant de graves perturbations (Henson et al., 2007). Cette catastrophe naturelle est considérée comme la deuxième plus grande de l'histoire du Canada. Un million de personnes se sont retrouvées sans électricité et une vingtaine de décès sont survenus au Québec (Regan, 1998; Statistics-Canada, 1998; Ressler et al., 2012).

Plusieurs études ont été menées afin de caractériser l'environnement propice à la formation de type de précipitations (Stewart et al., 1984; Stewart et King, 1987; Stewart et al., 1990a; Stewart et al., 1990b; Stewart, 1992; Stewart et al., 1995; Szeto et al., 1999; Robbins et Cortinas, 2002; Thériault et al., 2006; Thériault and Stewart, 2010). Ces études ont permis d'identifier certaines caractéristiques dynamiques et thermodynamiques des régions où on observe ces types de précipitations. Par exemple, Hanesiak et Stewart (1995) ont étudié une tempête produisant seulement du grésil à Saint John's, Terre-Neuve. Ils ont mis en évidence les conditions à grandes échelles nécessaires pour produire ces tempêtes ainsi que les processus de surface qui les intensifient.

1.1 Conditions de formation de types de précipitations

Les types de précipitation atteignant la surface peuvent exister sous différents états de l'eau : solide, liquide et une combinaison de solide et liquide (Glickman, 2000; Thériault et al., 2006; Thériault and Stewart, 2007). La définition de plusieurs types de précipitation se trouve dans Thériault et Stewart (2010), et est donnée comme suit :

- Pluie : Précipitation de gouttes d'eau liquide dont le diamètre est supérieur à 0.5 mm.
- Pluie verglaçante ou verglas : Pluie qui tombe sous forme liquide à des températures inférieures à 0 °C et gèle au contact avec la surface ou tout autre objet.
- Neige : Précipitation composée de cristaux de glace blanche ou translucide principalement en forme de branches hexagonales complexes et souvent agglomérées en flocons de neige.

- Grésil : Un type de précipitation constitué de cristaux transparents ou translucides de 5 mm de diamètre ou moins généralement sphériques.
- Neige mouillée : Neige contenant une grande quantité d'eau.
- Neige presque complètement fondue : C'est un mélange de liquide et de solide dans lequel la forme initiale du flocon de neige n'est pas discernable.

L'occurrence de différents types de précipitations hivernales nécessite des conditions météorologiques particulières. Par exemple, des épisodes de pluie verglaçante au Québec sont souvent associés à la présence d'une dépression dans la région des grands lacs (sud-ouest) qui est associée à de l'air chaud et humide et un anticyclone sur le Labrador (nord-est) associé à de l'air froid (Ressler et al., 2012). Une telle configuration a pour effet de favoriser une circulation persistante d'air froid du nord-est dans les bas niveaux de l'atmosphère qui force l'air chaud associé à la dépression à surplomber l'air froid. Ces conditions sont favorables à la formation d'une couche d'air chaud ($T > 0\text{ °C}$) en altitude et d'une couche d'air froid ($T < 0\text{ °C}$) près de la surface. Ce profil vertical de température permet différents changements de phases pouvant mener à la formation de pluie verglaçante, grésil et neige mouillée à la surface.

On peut classer les types de profils verticaux de température associés à une transition pluie-neige à la surface en 2 catégories. Premièrement, le profil du premier type (figure 1.1a) caractérisé par la présence d'une couche d'air chaud près de la surface. Ce type de profil est favorable à la formation de la neige mouillée, de la neige presque complètement fondue et de la pluie à la surface. Le second type de profil vertical de température (figure 1.1b) est constitué d'une couche d'air chaud ($T_w > 0\text{ °C}$) en altitude et d'une couche d'air froid ($T_w < 0\text{ °C}$) près de la surface. Ce type de profil est favorable à la formation de grésil et de la pluie verglaçante à la surface (Zerr, 1997). Donc, le profil de température de catégorie 1 mène à une transition : neige-neige mouillée- neige presque complètement fondue -pluie. En revanche, le

profil de température de catégorie 2 mène à une transition : neige-neige mouillée-grésil-pluie verglaçante-pluie (Stewart, 1992).

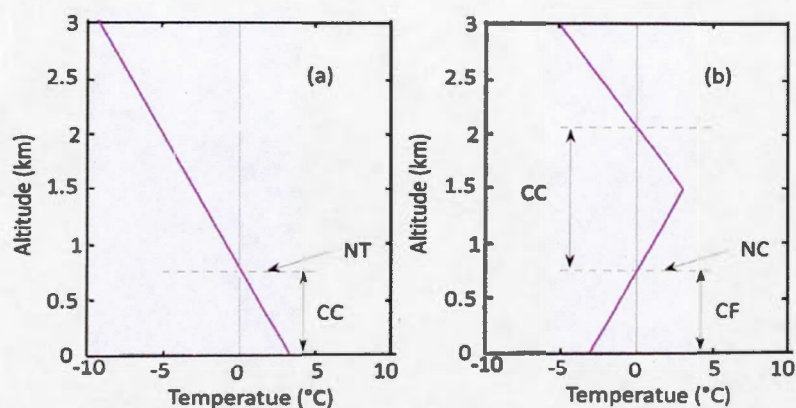


Figure 1.1: Profils de températures typiques pendant les tempêtes hivernales associées à un front chaud. (a) Profil favorable à la formation de la neige mouillée, de la neige presque complètement fondue et de la pluie à la surface. (b) Profil favorable à la formation du grésil et de la pluie verglaçante à la surface. Les symboles désignent : NT : niveau de transition, CC : couche chaude, NC : niveau critique et CF : couche froide.

1.2 Les processus de formation de types de précipitations

L'évolution du type de précipitation est influencée par le profil vertical de température. Par exemple, si la température est strictement inférieure à zéro, le seul type de précipitation atteignant la surface est la neige. En revanche, si la température oscille autour du point de congélation, les précipitations seront un mélange d'eau liquide et solide (Thériault et al., 2006).

Plusieurs types de précipitations peuvent se former si le profil de température présente une couche d'air chaud près de la surface (catégorie 1, figure 1.1a). La

neige en tombant dans la couche d'air chaud, commence à fondre pour se changer en neige mouillée, en neige presque complètement fondue et pluie.

Pour le profil vertical de température de la catégorie 2 (figure 1.1b), quand la neige tombe dans la couche d'air chaud, elle fond complètement ou partiellement et atteint le haut de la couche d'air froid ($T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) sous forme de pluie, de neige mouillée ou de la neige presque complètement fondue. Lorsque ces précipitations formées tombent dans des températures inférieures à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, celles-ci se changent en eau surfondue, neige mouillée regelée et grésil, respectivement. Le type précis de précipitation atteignant la surface dépend de l'épaisseur et de la température des couches chaudes en altitude et froides près de la surface (Zerr, 1997). Il est également possible d'obtenir un mélange de plusieurs types de précipitations à la surface à cause de la distribution de tailles des particules (Stewart et King, 1987; Stewart et al., 1995; Zerr, 1997; Thériault et al., 2006). Par exemple, les particules plus petites sont plus susceptibles de fondre complètement à l'intérieur de la couche de fusion que celles plus grandes (Stewart et al., 1990a; Zerr, 1997). Ainsi, les petits flocons vont fondre complètement et ne regèlera pas dans la couche d'air froid près de la surface tandis que les plus gros vont fondre partiellement et regèlent avant d'atteindre la surface. Il y aura alors un mélange de pluie verglaçante et de grésil à la surface. Afin de prévoir le type de précipitation, plusieurs techniques statistiques ont été développées. La prochaine section décrit ces techniques.

1.3 Techniques de prévision de types de précipitations

Malgré la compréhension croissante de la formation des types précipitations hivernales et les conditions météorologiques qui leur sont associées, leur prévision reste encore difficile. Cette difficulté est due d'une part à leur forte dépendance aux conditions environnementales telles que la température, l'humidité, les mouvements

d'air verticaux et horizontaux, les nuages et la distribution des noyaux glaçogènes. D'autre part leur formation révèle de changement de phase et de leur interaction lorsque les températures sont autour de 0 °C. Cependant il est connu depuis longtemps que le plus important facteur influençant les types de précipitations à la surface est le profil vertical de température (Wagner, 1957; Bocchieri, 1980; Czys et al., 1996). Des techniques statistiques ont été développées pour aider à la prévision des types de précipitations. Celles-ci tentent d'associer des conditions atmosphériques et le type de précipitation à la surface (Derouin, 1973; Cantin et Bachand, 1990; Ramer, 1993; Baldwin et al., 1994; Bourgouin, 2000;).

Voici un bref résumé de ces techniques:

- Derouin (1973): Cette méthode utilise l'altitude jusqu'à trois niveaux de congélation comme prédicteur. S'il existe plus d'un niveau de congélation, la différence d'altitude de ces niveaux est utilisée pour déterminer le type de précipitation. Par exemple, dans le cas d'un seul niveau de congélation, la pluie est prédite si l'altitude de ce niveau est supérieure à 610 m, sinon un mélange de pluie et neige est prédit.
- Cantin et Bachand (1990): Cette méthode utilise l'épaisseur des couches 1000-850 et 850-700 hPa comme prédicteurs de type de précipitation. Comme l'épaisseur d'une couche est directement reliée à la température moyenne de la couche. Par exemple, une épaisseur de la couche 850-700 hPa supérieure 154 dam indique en général que la température moyenne de la couche est supérieure à 0 °C et une épaisseur de la couche 1000-850 hPa inférieure à 131 dam indique que la température moyenne de la couche est inférieure à 0 °C.
- Ramer (1993): Cette méthode utilise la température (T), l'humidité relative (RH) et la température du thermomètre mouillé (T_w) de différents niveaux de pression pour diagnostiquer le type de précipitation.

- Baldwin et al. (1994): La base de cette méthode est de décider si oui ou non des cristaux de glace peuvent se former. Si oui, leurs changements de phase en tombant à travers l'atmosphère sont déterminés. Les cristaux de glace sont censés se former s'il y a présence d'une couche avec une variation de la température du point de rosée de 2 K et une température de 269 K.
- Bourguin (2000): Cette méthode consiste à comparer l'aire positive à l'aire négative sur un diagramme aérologique. Il définit une aire positive comme étant l'aire comprise entre isotherme 0 °C et le profil de l'environnement dans le cas où le profil est plus chaud que 0 °C. Une aire négative c'est l'aire comprise entre l'isotherme 0 °C et le profil de l'environnement dans le cas où le profil est plus froid que 0 °C. Une comparaison des aires positives et négatives est donc utilisée pour déterminer le type de précipitation à la surface.

Cependant les méthodes empiriques omettent la taille des particules, leur température et leur vitesse de chute et ne permettent pas les précipitations en phase mixe. Afin de prédire le type de précipitation plus adéquatement, des schémas microphysiques sont couplés aux modèles de prévisions météorologiques. Un schéma microphysique fait le paramétrage des différents processus de formation, d'interaction et d'évolution des différents hydrométéores prédits. Il existe présentement deux principaux types de schémas microphysiques, les schémas «bin» (Geresdi, 1998; Geresdi et al., 2014) et «bulk» (ex: Kessler, 1969; Sundqvist, 1978; Kong et Yau, 1997; Milbrandt et Yau, 2005a, 2005b; Morrison et Grabowski, 2007; Dorais, 2010; Thériault et Stewart, 2010; Milbrandt et Morrison, 2013). La figure 1.2 résume les suppositions apportées à la distribution de tailles pour les 2 types de schéma en comparaison avec les observations. Les schémas de type «bin» résolvent explicitement la distribution de tailles des particules et par conséquent, fournissent des solutions qui peuvent être plus rigoureuses. Ce type de schéma est très coûteux en temps de calcul et peut posséder plusieurs centaines de variables. Le second type, le schéma «bulk», est celui

principalement utilisé dans les modèles de prévision numérique du temps puisqu'il est moins coûteux en temps de calcul. Ces deux types schémas divisent les hydrométéores en plusieurs catégories telles que les gouttelettes de nuage, les cristaux de glace, la pluie, la neige. La différence principale est que la distribution de tailles est divisée en «bin» pour le premier type et pour le second, la distribution de tailles est décrite par une fonction de distribution de tailles, qui est la première supposition dans un schéma bulk (ex: Marshall et Palmer, 1948; Marshall et Langleben, 1954).

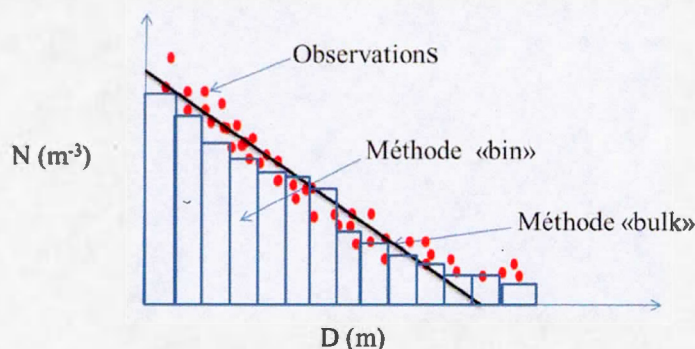


Figure 1.2 : Schéma représentant une distribution de taille d'une catégorie de précipitation, observée (rouge), représentée dans un modèle «bin» (bleue) et méthode «bulk» (noire).

Les schémas microphysiques « bulk » sont classifiés selon le nombre de moments que leurs distributions de tailles possèdent. Présentement, des schémas à un, deux ou trois moments ont été développés (ex : Sundqvist, 1978; Kong et Yau, 1997; Milbrandt et Yau, 2005a, 2005b; Morrison et Grabowski, 2007; Thériault et Stewart, 2010; Milbrandt et Morrison, 2013). Un nombre élevé de moments entraîne un plus grand nombre de degrés de liberté associé au spectre d'hydrométéores. Les schémas à simple moment prédisent uniquement le rapport de mélange en supposant les paramètres de la distribution de taille constants. Ainsi, dans la plupart des cas, ces schémas incluent des équations pronostiques séparées pour le rapport de mélange des

différentes catégories d'hydrométéores et un paramétrage détaillé de la précipitation et des processus d'évaporation et de condensation. Dans les schémas à double moment, le rapport de mélange et la concentration sont des variables pronostiques. L'ajout de la concentration a une influence directe sur la taille des particules.

Pour étudier les conditions météorologiques associées à la formation de verglas et de grésil, Thériault et Stewart (2010) ont développé un schéma microphysique à double moment qui est une version modifiée du schéma de Milbrandt et Yau (2005b). Ce schéma est particulièrement utile pour la prévision de type de précipitation quand la température est autour de 0 °C. Il inclut trois catégories d'hydrométéores solides : cristaux de glace (I), Neige (S) et grésil (IP), deux catégories liquides : particules de nuage (C), la pluie (R) et deux catégories semi-fondues : neige mouillée (WS) et neige presque complètement fondue (SL). Ces acronymes sont définis dans la liste des symboles. En outre ce schéma comprend plus de catégories de précipitations qui changent de phase selon que la température est au-dessus ou en dessous de 0 °C. La formation de ces catégories de précipitation dépend du degré de fonte des flocons de neige initiaux.

1.4 Paramètres influençant la fonte des flocons de neige

La fonte des précipitations solides affecte la formation des types de précipitations et les conditions météorologiques environnantes (Thériault et al., 2015). Le type de précipitation à la surface dépend fortement du taux de fonte au niveau critique (niveau qui sépare la couche $T_w > 0$ °C et la couche $T_w < 0$ °C). Ce niveau critique (NC, figure 1b) est situé entre le bas de la couche d'air chaud et le haut de la couche d'air froid. Le taux de fonte d'un flocon de neige est influencé par plusieurs paramètres dont certains directement (les paramètres l'équation 1.1) et d'autres indirectement. L'équation de fonte est

$$\begin{aligned} \frac{dm(D_x)}{dt} \Big|_{melt} = & -\frac{2\pi}{L_f} D_w F'(D_x) (K_a T_c - L_v \psi \rho \Delta q_s) \\ & - \frac{C_w T_c}{L_f} \left(\frac{dm_x}{dt} \Big|_{CL_{cx}} + \frac{dm_x}{dt} \Big|_{CL_{rx}} \right) \end{aligned} \quad 1.1$$

où T_c est la température, C_w la capacitance, D est le diamètre des flocons, ρ est la densité des flocons, L_f est la chaleur latente de fusion, $F'(D_x)$ est le facteur de ventilation, $F'(D_x) = A_x + B_x S_c^{1/3} R_e^{1/2}$, $R_e = V(D_x) D_x \rho / \mu S_c^{1/3}$, A_x et B_x sont des coefficients de ventilation, $S_c = \nu / \psi$ est le nombre de Schmidt. Le terme $\Delta q_s = q_{s0} - q$ est la différence entre le rapport de mélange de la vapeur d'eau entre la surface de la particule (supposée à une température de 0 °C) et l'environnement, respectivement.

Les paramètres de l'équation 1.1 tels que la température, l'humidité, le diamètre, la densité et la forme des flocons de neige ont un effet direct sur le taux de fonte. Les effets de la température de l'air, de l'humidité et du taux de précipitation initial sur le taux de fonte ont fait d'objets d'études (Zerr, 1997; Thériault et al., 2010). La température et l'humidité de la couche d'inversion influencent fortement le degré de fonte (Thériault et al., 2010). Mitra et al. (1990) ont trouvé que la distance à laquelle les flocons fondent complètement augmente de 100 m en utilisant une humidité de 90 % au lieu de 100 %.

D'autres paramètres tels que la vitesse terminale, l'épaisseur de la couche d'air chaud et la distribution de tailles ont un effet indirect sur la fonte. Premièrement, la vitesse terminale des flocons influe le taux de fonte car les flocons qui tombent plus rapidement vont passer moins de temps dans la couche de fusion que ceux qui tombent plus lentement. Deuxièmement, le taux de fonte du flocon dépend aussi de l'épaisseur de cette couche (Mitra et al., 1990; Thériault et al., 2010) car le flocon

passera plus de temps dans des températures supérieures à 0 °C dans une épaisse couche d'air chaud. Troisièmement, le taux de fonte dépend de la taille de la particule. Étant donné que la distribution de tailles des flocons de neige suit une fonction exponentielle inverse, les paramètres de la distribution de tailles (N_0 et λ) vont aussi influencer le taux de fonte. Une pente plus petite est généralement associée avec une plus grande concentration de gros flocons de neige. Les paramètres de forme des flocons de neige (densité, capacitance (forme), diamètre) qui sont des paramètres affectant la fonte pourraient avoir un impact important sur le type de précipitation en surface.

Plusieurs études ont examiné les caractéristiques des différents types de flocons de neige observés durant les tempêtes hivernales (Stewart et al., 1984; Sekhon et Srivastava, 1970; Locatelli et Hobbs, 1974; Rasmussen et al., 1999; Brandes et al., 2007; Thériault et al., 2012a; Thériault et al., 2012b). Elles ont montré qu'il existe plusieurs types de flocons de neige et leur vitesse de chute varie considérablement. Cette relation qui pourrait exister entre le type du flocon en altitude et la précipitation à la surface, motive le traitement détaillé des types de flocons de neige dans un schéma microphysique. Les schémas microphysiques actuellement utilisés dans les modèles ne tiennent pas compte de la forme variée des flocons de neige. Le besoin de développer un schéma microphysique capable de reproduire les interactions entre le type de flocon de neige en altitude et les types de précipitation à la surface motive ce projet.

1.5 Objectif

Étant donné l'importance de prévoir précisément le type de précipitation durant les tempêtes hivernales, il est nécessaire d'approfondir nos connaissances sur leurs mécanismes de formation. L'objectif de ce projet est d'évaluer l'impact du type de

flocon de neige formé en altitude sur le type de précipitation atteignant la surface. Pour ce faire nous avons utilisé un modèle de nuage à une dimension couplé à un schéma microphysique (Thériault et Stewart, 2010). Des modifications ont été apportées au schéma et au modèle de nuage. Quatre types de flocons de neige (dendrite, *bullet*, colonne et *graupel*) ont été testés avec le modèle, qui initialement comportait un type moyen de flocon de neige (*bulk-snow*). La pertinence d'inclure plusieurs types de flocons de neige dans les schémas microphysique a été évaluée à l'aide d'observations recueillies sur le terrain. Une étude idéalisée est ensuite menée.

Ce mémoire débute par la description du modèle de nuage à une dimension et le schéma microphysique à double moment de Thériault et Stewart (2010) utilisé dans cette étude (chapitre II). On y retrouve également les caractéristiques de types de flocons de neige testés, le calcul de leur vitesse terminale et la fraction liquide est expliquée. On explique aussi l'approche utilisée pour incorporer les types des flocons de neige dans le schéma. Dans le Chapitre III on trouve la description des données d'observation utilisées ainsi que les simulations menées. On explique également la procédure de l'étude théorique systématique menée. Le chapitre IV donne les résultats relatifs aux simulations des profils associés aux tempêtes définies dans le chapitre III. Il inclut l'analyse et la comparaison des simulations entre elles et entre les simulations et les observations. Le chapitre V discute des résultats de l'étude théorique systématique décrite dans le chapitre III. Ce mémoire termine par un résumé des résultats et une conclusion (chapitre VI).

CHAPITRE II

DESCRIPTION DU MODÈLE DE NUAGE ET LE SCHÉMA MICROPHYSIQUE

L'étude est menée à l'aide d'un modèle de nuage à une dimension couplé à une version modifiée du schéma microphysique de Thériault et Stewart (2010) qui est basé sur le schéma de Milbrandt et Yau (2005). Nous avons testé quatre autres types de flocons de neige (dendrites, *bullets*, colonnes et *graupels*) avec le modèle qui initialement comportait un type moyen de flocon de neige (*bulk-snow*).

2.1 Configuration générale du modèle de nuage

Cette étude est menée à l'aide d'un modèle de nuage à une dimension développé par Thériault et Stewart (2010). Ce modèle est initialisé avec des profils verticaux de température, de pression, d'altitude et de température du point de rosée. Il y a 100 niveaux verticaux régulièrement espacés. Une quantité de neige donnée est initialisée au-dessus de la couche chaude où elle chute continuellement avec un taux de précipitation initial donné (1 mm/h dans ce cas). Le modèle résout principalement la divergence de masse de l'équation de continuité pour les catégories d'hydrométéore et de la vapeur d'eau (Milbrandt et Yau, 2005a, b; Thériault et Stewart, 2010). Tous

les changements de masse se produisent dans le schéma microphysique. La masse totale est calculée avant et après le calcul des processus microphysiques ce qui permet la conservation de la masse à chaque pas de temps. Les échanges de chaleur dus aux changements de phases sont négligés dans cette étude car nous étudions uniquement l'évolution des flocons de neige à travers un profil vertical donné.

2.2 Description du schéma microphysique

Ce schéma microphysique est une version modifiée du schéma microphysique à double moment développé par Thériault et Stewart (2010). Un schéma à double moment prédit le rapport de mélange et la concentration totale pour chaque catégorie d'hydrométéore. Ce schéma se focalise sur les processus microphysiques dans la basse atmosphère (<4 km). Les tempêtes hivernales peuvent produire plusieurs types de précipitation en surface dépendamment des profils verticaux de température et d'humidité. Ce schéma est conçu pour prévoir les types de précipitations hivernales associés aux profils de température autour de 0 °C.

2.2.1 Configuration générale du schéma microphysique

La distribution de taille pour chaque catégorie d'hydrométéore est représentée par une fonction gamma en termes de diamètre des particules (Milbrandt et Yau, 2005b) :

$$N(D) = N_{0x} e^{-\lambda_x D} \quad 2.1$$

où N_{0x} et λ_x sont des paramètres de la distribution de taille de la catégorie x .

Afin de résoudre les paramètres de la distribution de taille N_{0x} et λ_x , deux moments de la distribution de taille sont prédits par le schéma. La définition de moment d'ordre p est :

$$M_p(p) \equiv \int_0^{\infty} D^p N_x(D) dD \quad 2.2$$

où D est le diamètre, $N_x(D)$ est la distribution de taille, p est l'ordre du moment et x la catégorie d'hydrométéores.

Les deux moments prédits par le schéma sont le moment d'ordre zéro qui est la concentration totale et le moment d'ordre d_x ($d_x=3$ sauf pour les particules de neige où d_x est donné dans la table1) qui est relié à la masse. Pour les particules de la neige presque complètement fondue, de grésil et particule liquide avec des coquilles de glace, seul le rapport de mélange est prédit car leurs tailles sont limitées par un diamètre minimal et maximal. Ceci permet de déterminer les paramètres de la distribution de tailles.

$$N_{0x} = N_{Tx} \lambda_x \quad 2.3$$

$$\lambda_x = \left[\frac{\Gamma(1 + d_x) c_x N_{Tx}}{\rho q_x} \right]^{\frac{1}{d_x}} \quad 2.4$$

où q_x et N_{Tx} sont respectivement le rapport de mélange et la concentration totale de la catégorie x , avec $x = C, R, S/WS, SL$.

Les hydrométéores sont divisées en plusieurs catégories représentant le spectre d'hydrométéores et les catégories sont divisées en trois branches : vapeur (vapeur d'eau), liquide (gouttelettes de nuage et la pluie) et solide (cristaux de glace, neige, la

grêle, graupel). Les gouttelettes de nuage sont des minuscules gouttelettes d'eau non précipitables. La pluie réfère à des gouttelettes d'eau précipitables. A ceux-là s'ajoutent deux catégories semi-fondues, la neige mouillée et la neige presque complètement fondue, qui sont des particules composées d'un mélange d'eau liquide et de glace (Thériault et Stewart, 2007; Thériault et Stewart, 2010; Thériault et al., 2012a). La figure 2.1 illustre un exemple de la distribution de taille des catégories d'hydrométéores simulées par le schéma.

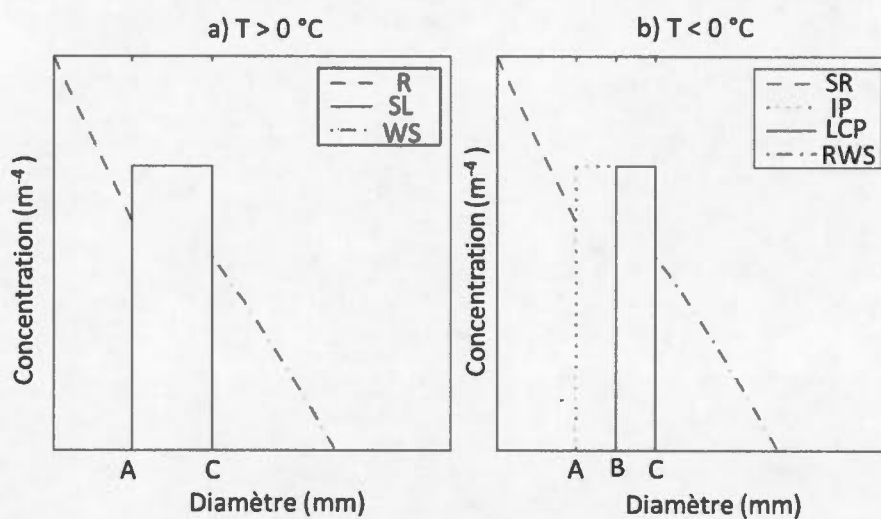


Figure 2.1 : Diagramme schématique de la distribution de taille des types de précipitations simulées. (a) : $T_w > 0^\circ\text{C}$, (b) $T_w < 0^\circ\text{C}$. A : désigne le diamètre minimal de la neige presque complètement fondue et du grésil respectivement en (a) et en (b). B : est le diamètre minimal du liquide avec des coquilles de glace. C : est le diamètre maximal de la neige presque complètement fondue en (a) et du grésil en (b). Les symboles de la légende sont définis dans la liste des symboles. Adopté de Thériault et Stewart (2010).

Il existe plusieurs mécanismes de formation des particules semi-fondues (Stewart et al. 1990a). La fonte partielle de la neige est le processus microphysique dominant

dans ce schéma. La fonte a lieu à des températures relativement chaudes ($T_w > 0\text{ °C}$) et les particules semi-fondues sont formées quand la neige fond progressivement. La quantité de neige fondue est divisée en trois catégories : pluie, neige presque complètement fondue et neige mouillée (Thériault et al., 2006) en fonction de la fraction liquide. Ce schéma traite la neige presque complètement fondue comme de la pluie et la neige mouillée comme de la neige en termes de masse. En termes de sédimentation, la pluie tombe plus vite que la neige presque complètement fondue et la neige un peu moins vite que la neige mouillée. Le seuil de transition entre la neige mouillée et la neige presque complètement fondue est déterminé par la fraction liquide (Mitra et al., 1990). On suppose que la neige mouillée peut avoir une fraction liquide maximale de 70 % et la neige presque complètement fondue une fraction minimale de 70 %. Lorsqu'un flocon de neige atteint une fraction liquide de 70 %, sa forme originale s'effondre et la particule devient de la neige presque complètement fondue.

2.2.2 Les processus microphysiques

Le schéma microphysique calcule les processus microphysiques chauds et froids ainsi que la sédimentation des hydrométéores. Les processus microphysiques froids se produisent à des températures du thermomètre mouillé inférieures 0 °C . Ils décrivent les interactions entre liquide et les particules congelées comme par exemple agrégation de la neige par la neige, collection des gouttelettes de nuage et de glace par la neige roulée et le grésil (Walko et al., 1995; Meyers et al., 1997).

À une température de thermomètre mouillé inférieure à 0 °C , des particules congelées vont fondre pour donner de la neige mouillée et de la neige presque complètement fondue (figure 2.2). Le taux de fonte d'une catégorie x donné par l'équation 1.1 décrit le bilan des échanges de chaleur entre le refroidissement dû à la fonte, la

conduction et de la convection à la surface de la particule, la chaleur latente d'évaporation et de condensation et de la chaleur sensible de la collection des gouttes d'eau de nuage, de la pluie et de la pluie surfondue (Lin et al., 1983; Rutledge and Hobbs, 1983; Wisner et al. 1972). La variation du rapport de mélange due à la fonte (QML_{xr}) est donnée par Thériault et Stewart (2010) :

$$QML_{xr} = \frac{2\pi}{L_f} N_{0x} (K_a T_c - L_v \psi \rho \Delta q_s) \cdot VENT_x \quad 2.5$$

où T_c est la température, ρ est la densité des flocons, L_f est la chaleur latente de fusion, $VENT_x$ est un facteur de ventilation pondéré de la catégorie x , ψ est le nombre de Schmidt, K_a est la conductivité thermique de l'air, N_{0x} est le paramètre de la distribution de tailles, Δq_s est la différence de rapport de mélange de la vapeur d'eau entre la surface de la particule et l'environnement.

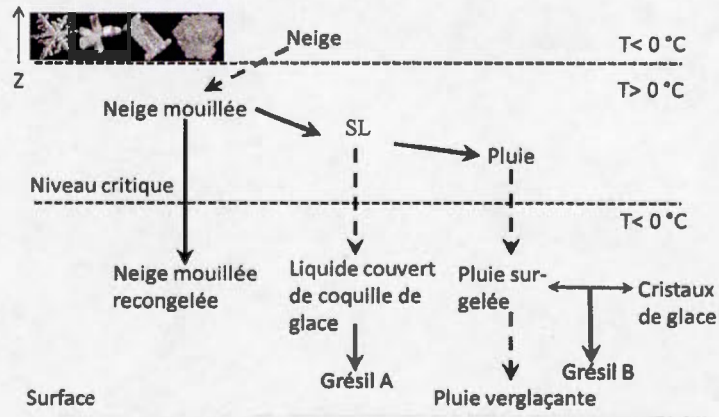


Figure 2.2 : Résumé des processus microphysiques et l'évolution des types de précipitations lors de la chute à travers la couche de fonte et de regel. La hauteur critique est indiquée ainsi que la température des différentes couches. Les flèches solides entre les types de précipitations indiquent un changement de variables pronostiques. Les flèches en pointillés indiquent que la précipitation a changé de nom mais garde la même variable pronostique. Les photos au-dessus du diagramme indiquent les différents types de flocons de neige testés dans le schéma. De gauche à droite nous avons le type dendrite, *bullet*, colonne et *graupel*. Adapté de Thériault et Stewart (2010).

À une température inférieure à 0 °C, le modèle calcule les processus décrivant la formation et l'interaction des particules congelées. Par exemple, il y a formation de *graupels* lorsque les flocons de neige et des gouttes d'eau entrent en collision. On note également que la formation de la glace est influencée par le gel homogène, la nucléation primaire de la glace, la conversion de la glace en *graupel* et en neige et la multiplication de la glace. La collection des gouttelettes de nuage et de glace est aussi calculée à cette température. La nucléation primaire de la glace requiert une température inférieure à -5 °C et une sursaturation par rapport à la glace. Le gel par contact se produit quand les gouttelettes de nuage entrent en collision avec les noyaux de glace. Le gel par contact a pour effet également d'initier la nucléation primaire de la glace dans un environnement sous-saturé par rapport à la glace. Les cristaux de glace peuvent être convertis en neige par trois différents processus : agrégation, croissance des cristaux de glace par givrage et déposition (Milbrandt et Yau, 2005a). La multiplication de la glace se produit à des basses températures mais proches du point de congélation. Le grésil peut être formé par le gel par immersion (Bigg, 1953), par conversion des *graupels* en grésil (Milbrandt et Yau, 2005b) et par le gel de la neige presque complètement fondue (Thériault et Stewart, 2010). Par contre le gel de la neige presque complètement fondue est plus probable car il peut se produire à des températures près de 0 °C. À basses températures inférieures à -40 °C les gouttes de pluie gèlent instantanément et forment des gouttes congelées (Ziegler, 1985). La variation de la concentration de la pluie due au gel probabiliste dans le modèle est décrite par Bigg (1953).

Les processus chauds décrivent les interactions entre les gouttelettes de nuage et les gouttes de pluie quand la température est supérieure ou égale 0 °C. Par exemple, les processus de coalescence, d'auto-conversion, d'accrétion et de collisions (Milbrandt et Yau, 2005b). Quand une gouttelette de nuage croît par coalescence, elle peut devenir une goutte de pluie ou de bruine, ce processus s'appelle auto-conversion

(Berry et Reinhardt, 1974). L'auto-collection se produit quand les gouttes de pluie entrent en coalescence. L'accrétion se produit quand les gouttelettes de nuage sont collectées par les gouttes de pluie. Si des gouttes de pluie de grande taille entrent en collision, elles peuvent se briser en petites gouttes de pluie. Les processus d'évaporation et de condensation qui explique la formation initiale des gouttelettes de nuage et leur croissance sont décrits dans Kong et Yau (1997). Thériault et Stewart(2006) ont amélioré la paramétrisation de ces processus pour les précipitations hivernales en ajoutant ceux des particules semi-fondues. Ainsi, l'évaporation et la sublimation de la neige presque complètement fondue(SL) et de la pluie sont permises dans le modèle. Les tendances du taux d'évaporation de la pluie (pluie surfondue) et la neige presque complètement fondue sont calculées en même temps. Ensuite, le rapport total d'eau évaporée au cours de la saturation par rapport à l'eau est calculé pour éviter la sursaturation due à une surestimation de l'évaporation dans la grille (Kong et Yau, 1997).

2.2.3 La sédimentation

La chute de toutes les catégories d'hydrométéores est permise dans le schéma sauf pour les gouttelettes de nuage (Ferrier, 1994; Milbrandt et Yau, 2005a). Le calcul de la sédimentation utilise la vitesse terminale pondérée, la concentration en nombre N_x et le rapport de mélange q_x pour chaque catégorie d'hydrométéore.

2.3 Paramétrage des différents types de flocons de neige

Dans cette étude, nous avons ajouté plusieurs types de flocons de neige au schéma microphysique de Thériault et Stewart (2010). Cette section décrit l'approche et les suppositions apportées pour faire ces modifications.

Plusieurs études ont fait objets de paramétrage des cristaux de glace (Heymsfield et Platt, 1984; Harrington et al., 1995; Cheng et al., 2007; Frick et al. 2013; Milbrandt et Morrison, 2013; Sulia et al., 2013). Le paramétrage des flocons de neige est analogue à celui des cristaux de glace, quelques études ont été menées (Woods et al., 2007). Mais les schémas microphysiques actuels considèrent seulement un type de flocon de neige. Comme résumé dans le diagramme de Kobayashi (1961), les flocons de neige ont des formes distinctes. Par exemple, voici la définition et les photos (figure 2.3) des flocons de neige incorporés au schéma microphysique :

- Dendrite (figure 2.3a): Ce sont des cristaux ramifiés avec des branches principales et des branches latérales, ils sont facilement repérables à l'œil nu, ils se forment à une température comprise entre -12 et -16 °C.
- *Bullet* (figure 2.3b): Cristaux en polygone régulier plus rétrécies que les colonnes et se forment entre -6 °C et -10 °C.
- Colonne (figure 2.3c): Cristaux en polygone régulier à plus de quatre cotés et qui forment souvent des zones en creux coniques en extrémité non visible à l'œil nu, ils se forment à une température comprise entre -6 et -10 °C.
- *Graupel* (figure 2.3d): Particule de neige fortement givrée, parfois appelé neige roulée, se distingue par sa forme conique ou hexagonale de 2 à 5 mm de diamètre, elle se forme à une température comprise entre -4 et -10 °C.

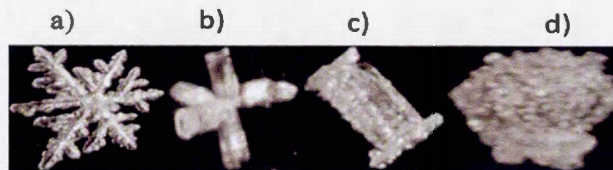


Figure 2.3 : Photos des types de flocons de neige : a) dendrites, b) *bullets*, c) colonnes d) *graupels*. Adaptées de Thériault et al. (2014).

Les principales variables caractérisant les flocons de neige sont la masse (densité) et la vitesse terminale. La masse des flocons de neige peut être décrite en fonction de leur diamètre :

$$m_x(D) = c_x D^{d_x} \quad 2.6$$

où m_x est la masse du type de flocon de neige x , D_x est le diamètre réel du flocon de neige, c_x et d_x sont des coefficients de masse qui dépendent du type de flocon de neige (tableau 2.1).

Plusieurs études ont montré que la vitesse terminale varie avec le type de flocons de neige pour un même diamètre (ex: Bashkirova et Pershina, 1964; Jiusto et Bosworth, 1971; Locatelli et Hobbs, 1974; Hanesch, 1999; Woods et al., 2007). Cela peut être dû à la différence de densité et de forme entre les cristaux. Un cristal et son agrégat peuvent avoir un mode de chute différent. La vitesse terminale d'un type de flocon x est donnée par :

$$V_x(D_x) = a_x D_x^{b_x} \quad 2.7$$

où V_x est la vitesse de chute du flocon de neige x de diamètre réel D_x , a_x et b_x sont des coefficients de vitesse terminale qui dépendent du type de flocon de neige (tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Constantes de masse et de vitesse terminale pour différents types de flocons de neige (Woods et al., 2007).

Types de flocons	c_x [kg m ^{1-d_x}]	d_x	a_x [m ^{1-b_x} s ⁻¹]	b_x
Bulk-Snow	0,069	2	8,996	0,42
Dendrite	0,054	2,19	1,68	0,217
Bullet	44	3	11,72	0,41
Colonne	45	3	73,53	0,65
Graupel	209,3	3	19,3	0,37

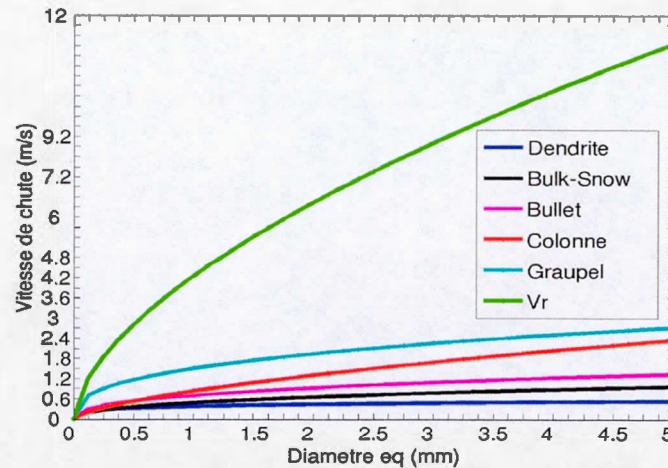


Figure 2.4 : Comparaison des vitesses terminales des flocons de neige dendrites, *bulk-snow*, *bullet*, colonne et *graupel* et de la pluie (V_r) en fonction du diamètre en équivalent liquide.

Une comparaison de vitesse terminale en fonction du diamètre en équivalent liquide pour cinq types de flocons de neige et celle des gouttelettes de pluie est présentée dans la figure 2.4. Les valeurs des coefficients de masse et de vitesse sont basées sur l'étude de Woods et al. (2007). Le type *bulk-snow* est pris comme référence pour la comparaison. On remarque qu'à un diamètre inférieur à 1,2 mm, la vitesse de chute des dendrites est comparable à celle du type *bulk-snow* (neige moyenne). Pour des diamètres supérieurs à 1,5 mm, la vitesse de chute des *bulk-snow* est le double de celle des dendrites. A l'inverse, les autres types chutent beaucoup plus rapidement que les *bulk-snow* (2 fois plus vite pour les *graupels*). La différence de vitesse terminale entre les *bulk-snow* (neige moyenne) et les quatre autres types de flocons est remarquable. Par exemple, la vitesse terminale des dendrites est 2 fois moins grande, elle est 2 fois plus grande pour les bullets et 3 fois plus grande pour les colonnes et les *graupels* (pour un diamètre > 4 mm) par rapport à celle de la neige

moyenne. Plus le diamètre des flocons est grand plus leur vitesse de chute est différente.

La vitesse terminale de la neige fondante dépend de la fraction liquide (Szyrmer et Zawadzki, 1999) et varie de la façon suivante:

$$V_m(f) = \frac{1}{af^2 + bf + c} \quad 2.8$$

où f est la fraction liquide et les paramètres a , b , c dépendent du type de flocon. Pour déterminer ces trois paramètres nous avons posé 3 conditions aux limites.

- (1) À $f=0$ $V_m(0) = V_s$,
- (2) À $f=1$, $V_m(1) = V_r$ où V_s et V_r sont, respectivement, la vitesse terminale de neige et de la pluie.
- (3) Le seuil de fraction liquide entre la neige mouillée et la de la neige presque complètement fondue est fixé à 70 % (Miltra et al., 1990; Thériault et Stewart, 2010).

Ces hypothèses nous permettent de déterminer les coefficients a , b , et c de l'équation 2.8. Après avoir trouvé la vitesse terminale de fonte de chacun des flocons, nous avons déterminé la vitesse terminale de la neige mouillée ($f_i=35$ %) et de la neige presque complètement fondue ($f_i=85$ %) pour chaque type de flocon. Les vitesses de chute de la neige mouillée et la de la neige presque complètement fondue sont, respectivement,

$$V_{ws}(D) = F(D, 0.35)$$

$$V_{sl}(D) = F(D, 0.85)$$

Pour un type de neige la variation de la vitesse terminale avec le diamètre est :

$$V_s(D_s) = a_s D_s^{b_s} \quad 2.9$$

où D_s est diamètre solide, qui est transformé en diamètre liquide équivalent par :

$$D_s = \left(\frac{\pi}{6} \rho_l \frac{1}{c_s} D_l^{d_r} \right)^{\frac{1}{d_s}}$$

2.10

où ρ_l est densité de l'eau, D_l le diamètre en équivalent liquide.

La vitesse terminale est calculée en fonction du diamètre liquide :

$$V_x(D_l) = a_w D_l^{b_w}$$

où a_w et b_w sont des coefficients de vitesse terminale correspondant au diamètre équivalent en liquide. Étant donné que le modèle utilise le diamètre réel des flocons, on doit faire une transformation du diamètre liquide en diamètre solide. Ainsi les coefficients sont recalculés pour chaque type de flocon de neige.

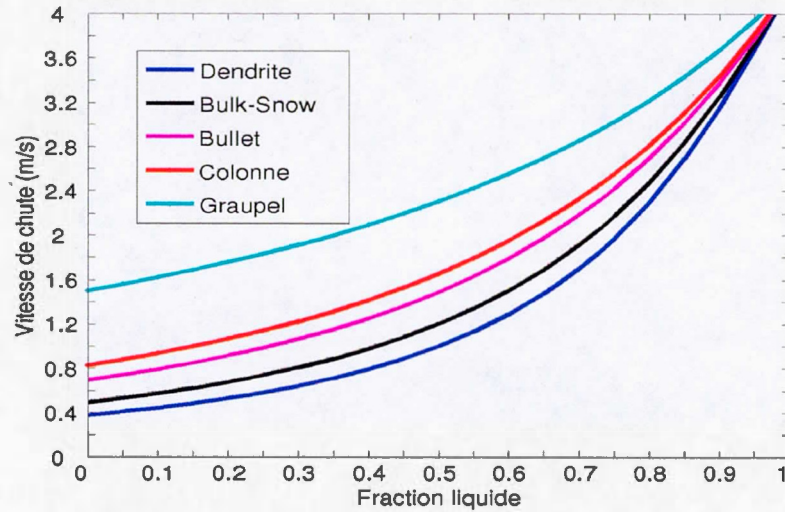


Figure 2.5 : Comparaison des vitesses terminales des flocons de neige de type dendrite *bulk-snow*, *bullet*, colonne, *graupel* en fonction de la fraction liquide.

La figure 2.5 représente la variation de la vitesse terminale en fonction de la fraction liquide des types de flocons étudiés. Nous avons choisi un diamètre de 1 mm. Premièrement, on remarque qu'à fraction liquide $f=0$, la vitesse terminale est respectivement de 0,4 m/s, 0,5 m/s, 0,6 m/s, 0,8 m/s et 1,5 m/s pour les dendrites, *bulk-Snow*, *bullet*, colonne et *graupel* ce qui correspond à la vitesse terminale à 1 mm de diamètre sur la figure 2.4. A une fraction liquide $f=1$, les vitesses de chutes de tous les flocons convergent à 4 m/s ce qui correspond à la vitesse de chute de l'eau à 1 mm de diamètre.

Le calcul des coefficients de masse et de vitesse terminale à fraction liquide $f=0\%$, 35% et 85% respectivement pour la neige, la neige mouillée et la neige presque complètement fondue est effectué pour chaque type de flocons de neige. L'incorporation des différents types de flocons s'effectue directement en changeant les valeurs des coefficients de masse et de vitesse terminale des différentes catégories de précipitations dans le modèle original. La conception des simulations faites avec le modèle modifié est décrite dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre décrit les observations et la méthode expérimentale utilisées afin de mener cette étude. Premièrement, le modèle de nuage à une dimension est validé à partir d'observations recueillies à Whistler (Colombie-Britannique) et à Saint John's (Terre-neuve). Dans ce genre d'étude la validation du modèle est faite de façon qualitative. Deuxièmement, une étude idéalisée est menée afin de quantifier l'effet des différents types de flocon de neige sur les précipitations à la surface.

3.1 Les observations disponibles

Afin de vérifier et tester les nouveaux types de flocons de neige, nous avons utilisé des observations détaillées qui étaient disponibles. La première série de donnée a été recueillie durant la campagne de l'expérience SNOW-V10 (Science and NOWcasting of Olympic Weather for Vancouver 2010) qui a eu lieu dans la région de Vancouver en Colombie-Britannique, lors des jeux olympiques et paralympique de Vancouver 2010 (Thériault et al., 2012c; Gultepe et al., 2014; Isaac et al., 2014; Thériault et al., 2014;). Les détails de la campagne de terrain et la cueillette de données sont décrits dans l'annexe A. La seconde série de données a été recueillie durant CASP II (Canadian Atlantic Storms Program II) qui a été mené près de Saint John's Terre-Neuve de janvier à mars 1992 (Hanesiak et Stewart, 1995; Lawson et al., 1998)

(Annexe A). Ces deux séries d'observations ont été choisies, car elles sont associées à deux types d'évolution verticale de types de précipitations associée à deux types de profils verticaux de température (figure 3.1).

Deux séries de simulations ont été effectuées. La première simulation est celle de la tempête observée le 7 mars 2010 à Whistler (Colombie-Britannique). Cette tempête est documentée par les observations de la campagne de terrain de l'expérience SNOW-V10 (Thériault et al., 2012c; Gultepe et al., 2014; Isaac et al., 2014; Thériault et al., 2014;). Les profils de température et d'humidité mesurés par la gondole entre le village et le sommet de la montagne Whistler sont favorables à la formation de la pluie et de la neige presque complètement fondue à la surface. Les profils mesurés à 2300 UTC le 7 mars 2010 ont été choisis pour initialiser le modèle. Les observations sur les types de flocons de neige et les types des précipitations à plusieurs niveaux de la montagne sont disponibles, permettant de faire la comparaison avec nos simulations.

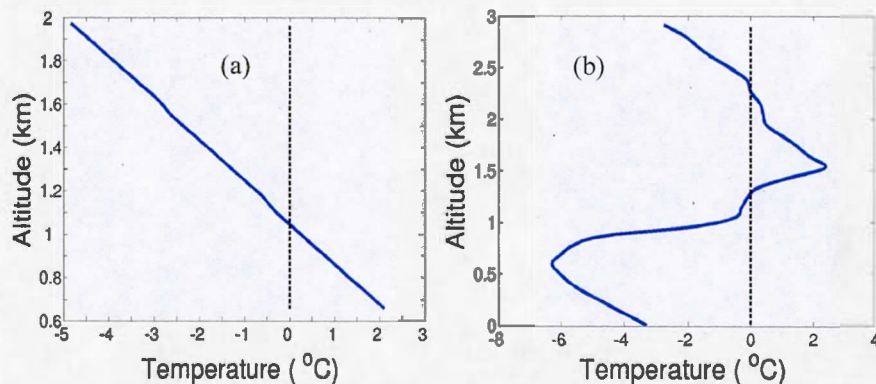


Figure 3.1 : Le profil vertical de la température du thermomètre mouillé : (a) recueillie par une station météorologique installée sur la gondole du center de ski Whistler (Whistler, BC). Les mesures ont été prises vers 2300 UTC le 7 mars 2010. (b) le radiosondage obtenu à 2315 UTC le 1^{er} février 1992 à Saint-Jean en Terre-Neuve.

La seconde simulation est celle d'une tempête de grésil observée le 1^{er} février 1992 à Saint John's, Terre-Neuve. Les profils de température et d'humidité observés sont favorables à la formation de grésil et de la pluie verglaçante. Les profils verticaux utilisés pour initialiser le modèle sont ceux d'un radiosondage à 23h15 UTC le 1^{er} février 1992. Pour la comparaison de nos simulations avec les observations, on dispose des informations sur l'altitude de la couche d'air chaud obtenues à partir de mesure d'aéronefs ainsi que les types de précipitations à la surface, détaillés dans Hanesiak et Stewart (1995).

Les deux séries de simulations ont été effectuées avec le modèle de nuage à une dimension couplé au schéma microphysique. Le modèle a été initialisé avec des profils verticaux de température et humidité mesurés. Le taux de précipitation initial utilisé est de 1 mm/h, qui correspond environ au taux de précipitation observé dans les deux cas. Les échanges de chaleur lors de la fonte ou de regel des précipitations ont été négligés. Les simulations ont une durée de 2 h. Les types précipitations formés à la verticale ont été analysés à la 90^{ème} minute ce qui correspond au moment où le modèle produit un taux de précipitation constant à la surface. Les types de précipitation à la surface ont été analysés et comparés aux observations.

Il faut noter que la sublimation et la déposition de la neige sont négligées dans nos simulations et on considère une atmosphère saturée par rapport à l'eau liquide si la température $T_w > 0$ °C et par rapport à la glace si $T_w < 0$ °C sur toute la colonne. Donc nous avons pris la température du thermomètre mouillé pour tenir compte de l'humidité. Les résultats sont présentés sous forme de profils verticaux. Les types de précipitations formées à la verticale et à la surface, ainsi que le comportement des flocons de neige quand ils tombent dans la couche chaude/froide ont été analysés et comparés aux observations. La comparaison se fera simultanément entre les simulations et entre les simulations et les observations. Étant donné que le modèle a été initialisé avec les profils observés, une comparaison qualitative entre les

simulations et les observations permettra de valider le modèle. Par exemple, l'altitude de début et de fonte complète simulée et observée peut être comparée et de même que les types de précipitations à différents niveaux de la verticale.

3.2 Étude théorique systématique

Une fois notre modèle comparé à des observations, nous l'avons utilisé pour faire une étude théorique. Elle consiste à initialiser le modèle avec un profil théorique favorable à la formation de pluie verglaçante et de grésil. Ce profil est défini par la présence d'une couche d'air chaud en altitude ($T_w > 0\text{ °C}$) au-dessus d'une couche d'air froid ($T_w < 0\text{ °C}$) près de la surface. La couche d'air chaud permet la fonte partielle ou complète de la neige en altitude. La couche d'air froid permet le regel partiel ou complet de ces précipitations fondues ou partiellement fondues (Thériault et Stewart, 2007). Ce profil s'étend jusqu'à 2 km d'altitude. À partir de la surface la température croît avec un taux correspondant à une atmosphère standard soit un taux de $6,5\text{ °C/km}$ jusqu'au milieu de la couche chaude et décroît avec le même taux jusqu'à 2 km. Ce sont des profils verticaux de températures typiques durant des épisodes de pluie verglaçante et grésil (Zerr, 1997). Les échanges de chaleur dus aux changements de phases sont négligés afin de connaître le type de précipitation produit dans ces conditions. On considère une atmosphère saturée par rapport à l'eau si la température est $> 0\text{ °C}$ et par rapport à la glace si elle est $< 0\text{ °C}$. La neige chute continuellement avec un taux initial de 1 mm/h à 2 km. Des paramètres influençant la formation de type de précipitation ont été systématiquement variés (figure 3.2). Ceux-ci sont les profondeurs de la couche d'air chaud et froid ainsi que les températures maximales et à la surface.

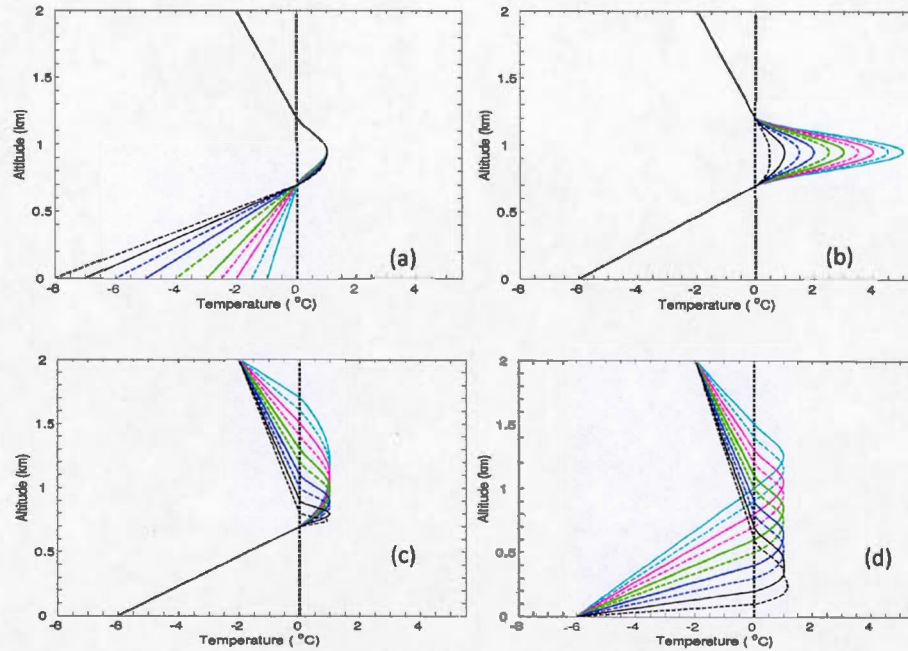


Figure 3.2 : Profil de température favorable à la formation du verglas et du grésil. (a) variation de la température de surface de -8 °C à -1 °C, (b) variation de la température maximale de la couche chaude de 0.5 °C à 5, (c) variation de l'épaisseur de la couche chaude de 100 m à 1000 m, (d) variation de l'épaisseur la couche froide de 100 m à 1000 m. Les températures sont variées de 0.5 °C et les épaisseurs de 100 m.

CHAPITRE IV

COMPARAISON DES RÉSULTATS THÉORIQUES AVEC LES OBSERVATIONS

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des simulations effectuées avec les profils verticaux de température observés. Une analyse de d'évolution des types de précipitations formées en altitude et en surface a été effectuée.

4.1 Transition pluie-neige en terrain montagneux

Cette section traite l'étude de la formation de différents types de précipitation à Whistler en Colombie-Britannique. Les profils de température et d'humidité observés dans cette région sont favorables à la formation de la neige presque complètement fondue et de la pluie à la surface ainsi qu'une zone de transition pluie-neige bien définie en altitude. Ces profils sont tels qu'on a une couche d'air chaud près de la surface (figure 3.1a).

4.1.1 Distribution de tailles initiale

La figure 4.1 montre la comparaison des distributions de tailles initiales des différents types de flocons de neige simulée au-dessus de la couche d'air chaud. Ces distributions de tailles sont obtenues à partir de l'équation (2.1). Les paramètres N_{0x} et λ_x sont issus du modèle. Le diamètre des flocons ont été varié arbitrairement

jusqu'à un diamètre maximal donné. On constate que la distribution de tailles varie considérablement d'un type de flocon à l'autre. Par exemple, la valeur de l'abscisse, N_0 est plus grande pour les dendrites ($\sim 10^5$ à 10^7 m^{-4}) et plus petite pour les colonnes et les *graupels* ($\sim 10^5$ à 10^6 m^{-4}), car les dendrites sont moins denses et donc de concentration plus élevée. On remarque que la distribution de tailles du type *bulk-snow* couvre une large gamme de taille (10^5 m^{-4} à 10^7 m^{-4}). Pour des petits flocons de neige ($D < 1 \text{ mm}$), le type *bulk-snow* a une distribution semblable à celles des dendrites tandis que leur distribution de tailles est semblable à celles des *bullets* et colonnes pour $D > 3 \text{ mm}$. Cette situation s'explique par le fait que le type *bulk-snow* a des coefficients de masse proche de celui du type dendrite mais des coefficients de vitesse comparables à ceux des types *bullets* et colonnes. Le type *graupel* a une distribution de tailles légèrement inférieure à celle des autres types étudiés. Le type *graupel* a la plus petite pente et le type dendrite la plus grande. Les colonnes et *bullets* ont une distribution de tailles initiale semblable sur toute la gamme de diamètre $< 4 \text{ mm}$.

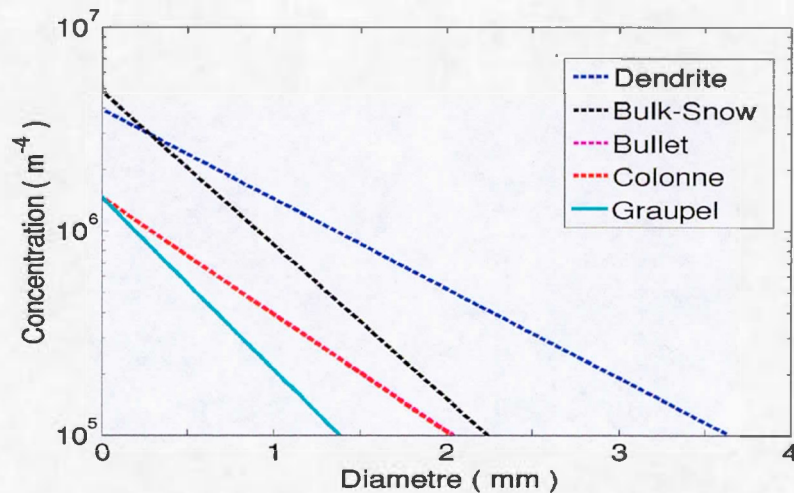


Figure 4.1 : Distributions de tailles initiales simulées à la station RND (1856 m) à Whistler le 7 mars 2010 au environ de 2300 UTC. Les différentes lignes en couleur correspondent aux types de flocons de neige identifiés par la légende.

4.1.2 L'évolution verticale de types de précipitations formés

L'évolution verticale du contenu en masse des différentes catégories de précipitation simulées dans une colonne est présentée sur la figure 4.2. Toutes différences dans la distribution de types de précipitation sont dues uniquement aux types initiaux du flocon de neige en altitude.

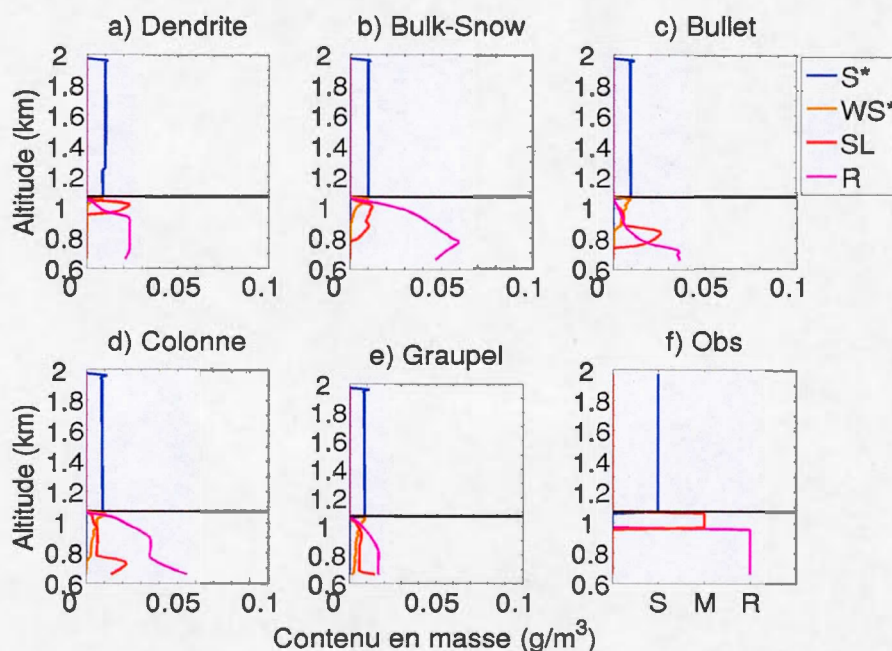


Figure 4.2 : L'évolution verticale du contenu en masse de types de précipitations simulés pour cinq types de flocons neige : a) dendrite, b) *bulk-snow*, c) *bullet*, d) colonne, e) *graupel* et f) observation à Whistler le 7 mars 2010 à environ 23 h. La hauteur de la couche chaude ($T_w > 0^\circ\text{C}$) est matérialisée par la ligne noire épaisse. Les symboles de la légende figurent dans la liste des symboles. Les variables marquées d'un étoile (*) sont 10 fois plus grandes que leurs valeurs sur le graphe.

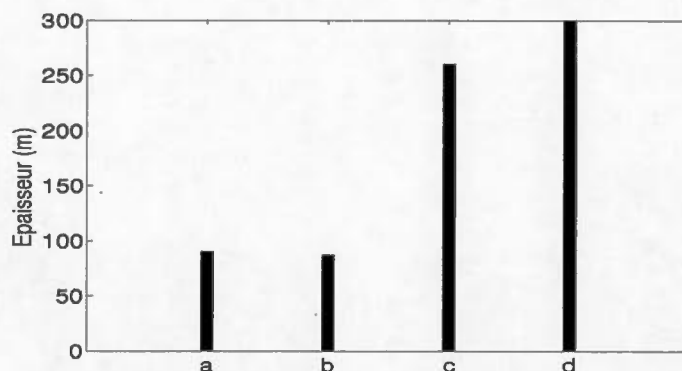


Figure 4.3 : Comparaison de l'épaisseur de la couche de transition pluie-neige observée et simulée pour différent type de flocon de neige. En **a** : l'observation, **b** : type de flocon dendrite, **c** : *bulk-snow*, **d** : *bullet*. Le modèle est initialisé avec les profils de température et d'humidité observés à Whistler.

La neige, en tombant dans la couche d'air chaud, commence à fondre. On observe alors un mélange de plusieurs types de précipitations, neige, neige presque complètement fondue et pluie. La formation de la neige presque complètement fondue pour tous les flocons de neige commence à 1050 m car c'est la hauteur où $T_w > 0$ °C. La zone où on observe un mélange de types de précipitations est appelée zone de transition pluie-neige (Stewart, 1992). L'épaisseur de cette couche est définie comme étant la différence entre l'altitude de début de fonte des flocons de neige et l'altitude de fonte complète. Cette zone (figure 4.3) est différente pour les simulations menées avec différents types de flocons de neige. Par exemple, l'épaisseur est de 87 m pour les dendrites, 260 m pour les *bulk-snow* et de 300 m pour les *bullets*. Quant aux simulations faites avec les colonnes et *graupels*, cette zone s'étend d'une altitude de 1050 m jusqu'à la surface (658 m au-dessus du niveau de la mer). On remarque que l'altitude à laquelle la neige presque complètement fondue devient de la pluie varie avec le type de flocon de neige. Par exemple, les dendrites vont fondre complètement à une altitude de 305 m au-dessus du sol tandis que le *bulk-snow* à 132 m et les *bullets* à 92 m. Pour les flocons de types colonnes et *graupels*, un mélange de précipitation atteint la surface donc il n'est pas possible de

quantifier la région de neige seulement à pluie seulement. Cette différence est probablement due à leur vitesse terminale qui est, respectivement, de l'ordre de 0,5 m/s, 1 m/s, 1,4 m/s, 1,8 m/s et 2,3 m/s pour les dendrites, *bulk-snow*, *bullets*, colonnes et *graupels* pour un diamètre de 5 mm. Plus la vitesse de chute d'un flocon est élevée, moins il passe de temps dans la couche d'air chaud, ce qui réduira son taux de fonte.

La distribution verticale de types de précipitations observée lors de la campagne SNOW-V10 rapporte de la neige entre 2000 m et 1050 m au-dessus du niveau de la mer, un mélange de pluie-neige entre 1050 m et 960 m et de la pluie jusqu'au sol (658 m au-dessus du niveau de la mer). La comparaison entre les simulations et les observations se fera qualitativement. L'épaisseur de la zone de transition pluie-neige observée est de 90 m et sa hauteur par rapport au niveau du village Whistler est 302 m. On remarque que le modèle initié avec le type de flocon dendrite simule bien l'épaisseur et la hauteur de la ligne pluie-neige. Le modèle avec le type *bulk-snow* surestime l'épaisseur de la ligne mais sous-estime sa hauteur. Quant aux modèles avec les types colonnes et *graupels*, ils surestiment largement l'épaisseur et la hauteur de la ligne de transition pluie-neige.

Les distributions de taille de tous les types de précipitations associés aux profils verticaux de température et d'humidité observés à Whistler sont présentées dans figure 4.4. Les figures 4.4a à 4.4e illustrent la distribution de tailles des types de précipitations formés dans la couche d'air chaud à 850 m. Nous avons la distribution de tailles de la pluie, de la neige presque complètement fondue et de la neige mouillée pour tous les types de flocons sauf pour les dendrites où on observe de la pluie et de la neige presque complètement fondue à cette altitude. Cela se produit car les flocons moins denses fondent plus vite que les plus denses flocons de neige. La distribution de tailles des gouttelettes de pluie est associée à des petites particules donc de concentration plus grande. Celle de la neige mouillée est associée à des particules de

grandes tailles donc de concentration plus faible. La distribution de tailles de la neige presque complètement fondue est comprise entre celle des gouttelettes de pluie et de la neige mouillée pour tous les types de flocons de neige et est limitée par un diamètre minimal et maximal. Il faut noter également que la concentration en nombre des gouttelettes de pluie est plus élevée pour les flocons de neige plus denses. Par exemple, la concentration maximale pour les *graupels* est un peu plus que 10^7 m^{-4} et celle des dendrites un peu moins que 10^7 m^{-4} . Cela est dû du fait que la quantité de pluie formée avec les dendrites est plus petite que celle formée avec *graupels*.

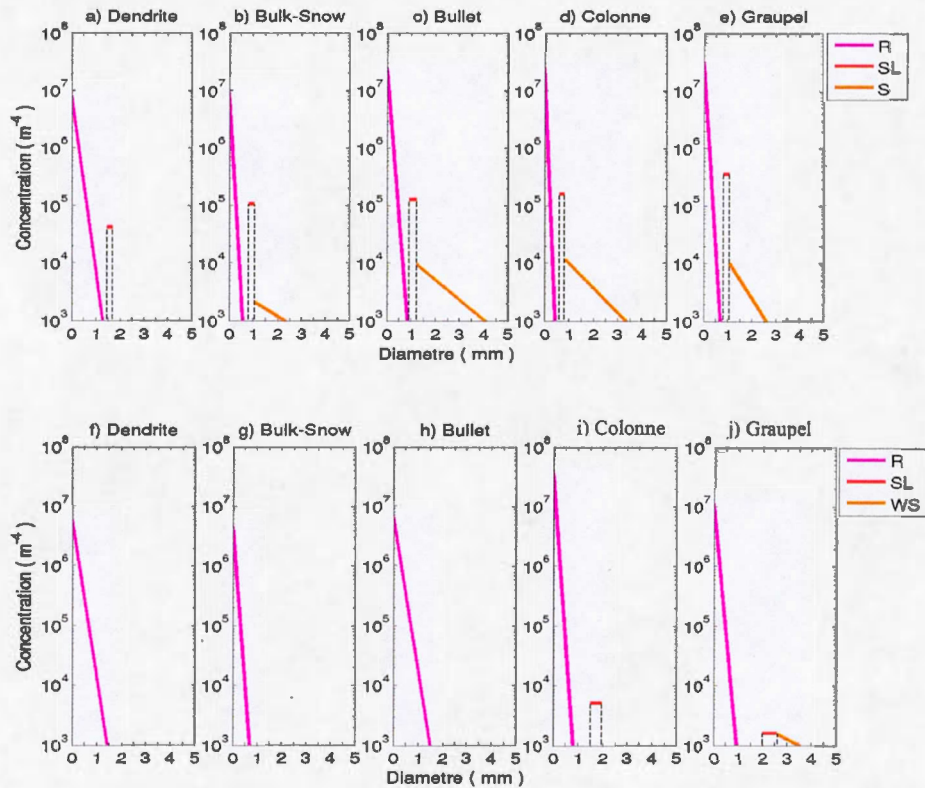


Figure 4.4 : Distribution de tailles de types de précipitations formés à différents niveaux : de (a) à (e), début de la couche chaude (850 m). De (f) à (j), en surface (658 m). Les traits pointillés désignent les diamètres seuils. Les symboles de la légende sont dans la liste des symboles.

Les figures 4.4f à 4.4j montrent la distribution de tailles des types de précipitations à la surface pour les différents types de flocons étudiés. Nous avons uniquement de la pluie pour les dendrites, les *bulk-snow* et les *bullets*. Cela illustre bien la situation observée car la pluie seule a été observée à la surface et 30 % des flocons observés étaient des dendrites et le reste était des agrégats. Les colonnes donnent une distribution de tailles de la neige presque complètement fondue et des gouttelettes de pluie à la surface. Les *graupels* donnent une distribution de tailles de la neige mouillée, de la neige presque complètement fondue et des gouttelettes de pluie à la surface. La concentration en nombre des particules de neige presque complètement fondue et des gouttelettes de pluie formées à la surface par les *graupels* est supérieure à celle formée par les colonnes. Les résultats sont cohérents aux hypothèses que les flocons moins denses fondent complètement et les plus denses fondent partiellement.

La figure 4.5 illustre les diamètres seuils entre les types de précipitations formés. Le diamètre seuil d'un type de précipitation est défini comme étant le diamètre à partir duquel la précipitation change de type. On remarque en premier lieu que l'altitude de transition de types de précipitations varie considérable selon le type de flocon de neige. La transition entre la neige mouillée et la neige presque complètement fondue s'effectue respectivement à 990 m, 850 m et 720 m 820 m pour les dendrites, les *bulk-snow*, les *bullets* et les colonnes. La transition entre la neige presque complètement fondue et la pluie s'effectue respectivement à 950 m, 780 m, 720 m, pour les dendrites, les *bulk-snow* et les *bullets*. Ces altitudes correspondent aux niveaux où la neige presque complètement fondue a complètement fondu en pluie, ce qui n'est pas le cas pour les colonnes et les *graupels*. En second lieu, le diamètre auquel la transition neige presque complètement fondue -pluie s'effectue dépend également du type de flocon initial. Il est respectivement de 1,5 mm, 1,8 mm et 2,5 mm pour les dendrites, les *bulk-snow* et les *bullets*.

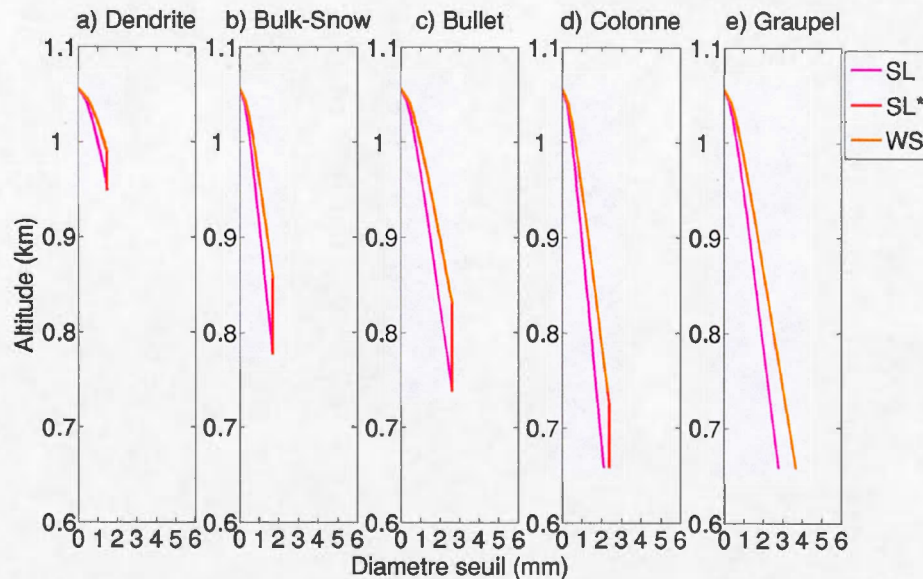


Figure 4.5 : L'évolution verticale des diamètres seuils simulés le 7 mars 2010 à Whistler pour cinq types de flocons neige : a) dendrite, b) *bulk-snow*, c) *bullet*, d) colonne, e) *graupel*. WS est le seuil entre la neige et la neige mouillée, SL* est le diamètre maximal de la neige presque complètement fondue seuil entre la neige mouillée et la neige presque complètement fondue et SL le seuil entre la neige presque complètement fondue et la pluie.

4.1.3 Comparaison de types de précipitations à la surface

Une analyse détaillée de types de précipitations formés à la verticale a été réalisée. Dans cette sous-section, nous allons nous concentrer sur les types de précipitation atteignant la surface par rapport au taux de précipitation total (%). Pour déterminer le type de précipitation à la surface, nous allons exprimer l'accumulation de la précipitation en pourcentage. Le pourcentage d'un type de précipitation est le rapport entre le taux de précipitation de ce type au taux de précipitation total.

Le pourcentage des types de précipitations à la surface associé aux profils de température et d'humidité observés à Whistler est illustré à la figure 4.6. Pour les

bulk-snow, dendrites et *bullets*, on note seulement de pluie à la surface, tandis que les colonnes produisent un mélange de neige presque complètement fondue et de pluie et que les *graupels* produisent un mélange de neige mouillée, de neige presque complètement fondue et de pluie. On constate que le pourcentage de type de précipitation sous forme de pluie est le double de celui de la neige presque complètement fondue pour les colonnes, 65 % et 34 %, respectivement. Quant aux *graupels*, c'est la neige presque complètement fondue qui double celui de la pluie, 69 % et 24 %, respectivement. Les *graupels* sont les seuls qui produisent de la neige mouillée à la surface (6%) car ils fondent moins dans la couche chaude. La fonte rapide des flocons moins denses tels que les *bulk-snow*, dendrites et *bullets* explique la présence de la pluie à la surface. La fraction de la neige presque complètement fondue formée par les *graupels* est le double de celle formée par les colonnes car le taux de fonte des colonnes est plus petit que les *graupels*.

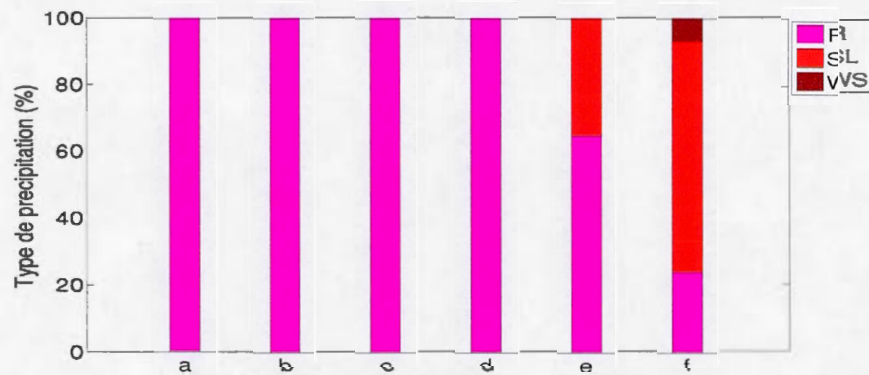


Figure 4.6 : Comparaison de types de précipitations à la surface observés et simulés en fonction des types initiaux de flocon de neige. Les types de précipitations sont normalisés par rapport au taux de précipitation. En a) l'observation, b) type de flocon dendrite, c) *bulk-snow*, d) *bullet*, e) colonne, f) *graupel*. Le modèle est initialisé avec les profils de température et d'humidité observés à Whistler. Les symboles de la légende sont identifiés dans la liste des symboles.

4.2 Profil typique associé à la formation de grésil

La section précédente se concentrait sur la formation de précipitations hivernales associées à un profil typique de température où une couche d'air chaud se situe près de la surface. Dans cette partie, une couche d'air froid est ajoutée près de la surface juste en dessous de l'air chaud. Les modèles sont initialisés avec le profil de température observé à Saint John's le 1^{er} février 1992 (figure 3.1.b) car du grésil et de la pluie verglaçante ont été observés à la surface.

4.2.1 L'évolution verticale de types de précipitations formés

L'évolution verticale du contenu en masse de types de précipitations simulés avec les profils verticaux de température et d'humidité observés à Saint John's le 1^{er} février 1992 est donné dans la figure 4.7. Nos résultats démontrent que la neige commence à fondre à une altitude de 2,3 km qui correspond au début de la couche chaude ($T_w > 0$ °C). Celle-ci est convertie en neige mouillée et en neige presque complètement fondue. La neige mouillée fond ensuite en neige presque complètement fondue et en pluie car la couche d'air chaud est relativement épaisse (1000 m). On remarque que les dendrites, *bulk-snow* et *bullets* fondent complètement en tombant à travers la couche d'air chaud tandis que les colonnes et *graupels* fondent partiellement. Cette différence est due à leur vitesse terminale. La fonte est plus lente pour les flocons de neige de vitesse terminale grande et de taille moindre. En résumé, l'épaisseur de la couche de transition pluie-neige (figure 4.8) est de 300 m pour les dendrites, 700 m pour le type *bulk-snow*, et 750 m pour les *bullets*. Ces 3 types de flocons mènent à de la pluie verglaçante à la surface étant donné que seulement de la pluie arrive en haut de la couche d'air froid.

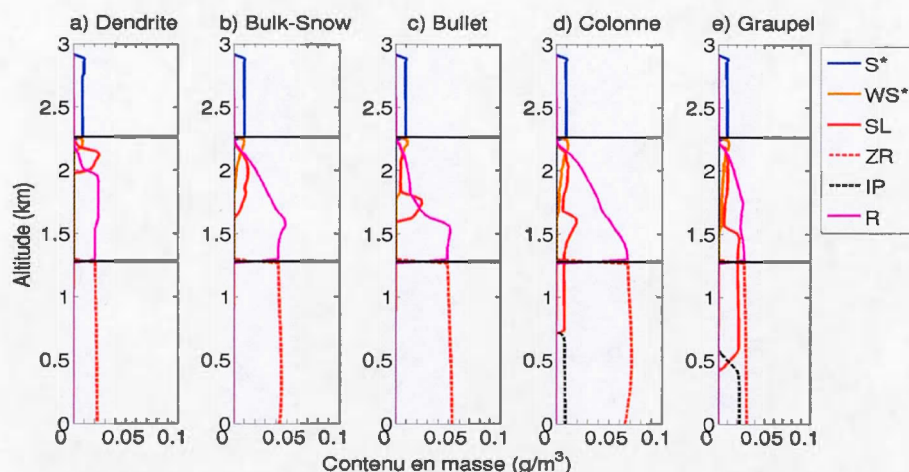


Figure 4.7 : L'évolution verticale du contenu en masse de types de précipitations simulés pour cinq types de flocons neige à Saint John's. En a) dendrite, b) *bulk-snow*, c) *bullet*, d) colonne, e) *graupel*. Les deux lignes noires épaisses limitent la couche chaude ($T_w > 0$ °C). Les symboles de la légende sont dans la liste des symboles. Les variables marquées d'un étoile (*) sont 10 fois plus grandes que leurs valeurs sur le graphique.



Figure 4.8 : Comparaison de l'épaisseur de la couche de transition pluie-neige simulée pour différent type de flocon de neige. En a : type de flocon dendrite, b : *bulk-snow*, c : *bullet*. Le modèle est initialisé avec les profils de température et d'humidité observés à Saint John's.

Lorsque de la neige presque complètement fondue ou un mélange de de neige presque complètement fondue et pluie arrivent dans la couche de regel, une couche de glace se forme à la surface de ces particules donnant des particules formées de liquide entouré d'une coquille de glace. Au cours de leur chute dans la couche de regel, ces particules gèlent graduellement en grésil.

Les distributions de taille de tous les types de précipitations associés aux profils verticaux de température et d'humidité observés à Saint John's sont présentées à la figure 4.9. Sur les figures 4.9a-e on observe la distribution de tailles des types de précipitations formés au sommet de la couche d'air chaud située à 2 km d'altitude. À cette altitude, les types de précipitations formées à partir de tous les types de flocons initiaux sont de la pluie, de neige presque complètement fondue et de la neige mouillée. La distribution de tailles de gouttelettes de pluie est associée à des particules plus petites, alors que celle de la neige mouillée contient des particules plus grandes donc de concentration plus petite. En outre, la distribution de tailles de la neige presque complètement fondue est comprise entre celle des gouttelettes de pluie et de la neige mouillée pour tous les types de flocons de neige et est limitée par un diamètre minimal et maximal.

La distribution de tailles de la pluie et de la neige presque complètement fondue à 1.5 km qui correspond au niveau critique est illustrée aux figures 4.9f-j. À cette altitude, la neige presque complètement fondue formée à partir de dendrites, *bulk-snow* et *bullets*, a complètement fondu en pluie. En revanche, les colonnes et *graupels* ne fondent pas complètement et de la neige presque complètement fondue atteint le sommet de la couche d'air froid. La concentration en nombre des particules de neige presque complètement fondue pour les colonnes est plus grande que celle des *graupels*. Les résultats sont cohérents aux hypothèses que les flocons moins denses fondent complètement dans la couche chaude et les plus denses fondent partiellement.

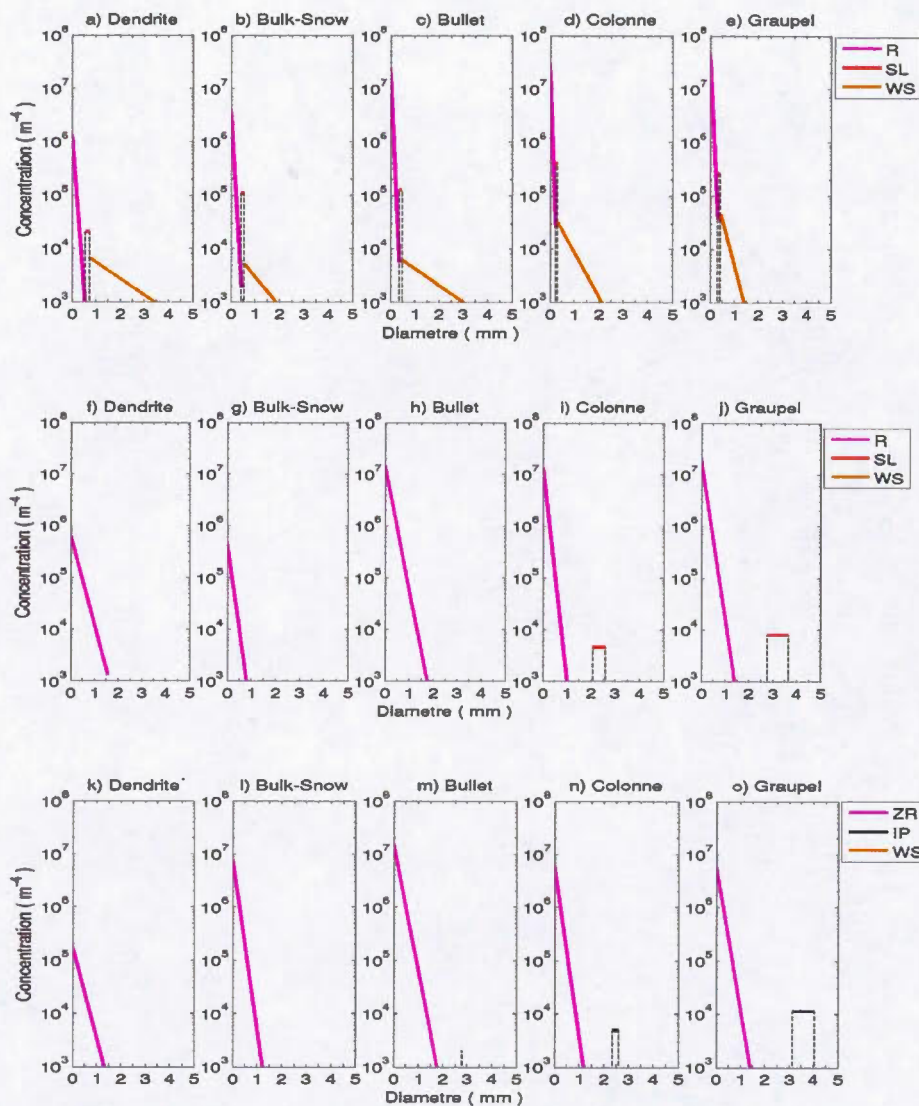


Figure 4.9 : Distribution de tailles de types de précipitations formés à différents niveaux : a) à e), début de la couche chaude (2 km). f)- j) au niveau critique (1.5 km), k)-o) en surface (130 m). Les traits pointillés désignent les diamètres seuils. Les symboles de la légende sont identifiés dans la liste des symboles.

La distribution de tailles des types de précipitations à la surface pour les différents types de flocons étudiés est illustrée dans les figures 4.9k à 4.9o. Encore une fois, les dendrites, *bulk-snow* et les *bullets* forment uniquement de la pluie verglaçante. Les colonnes et les *graupels* génèrent une distribution de tailles associée avec du grésil et de la pluie verglaçante à la surface. La distribution de tailles de la pluie verglaçante est associée à des particules plus petites semblables à celle de la pluie. La distribution de tailles de grésil est comprise entre celle de la pluie verglaçante et de la neige mouillée et est limitée par un diamètre minimal et maximal. Le diamètre moyen de transition entre le grésil et la pluie verglaçante est de 1.5 mm pour les dendrites. Il est respectivement de 2 mm pour les *bulk-snow*, 2.5 mm pour les *bullets* et les colonnes et 3.5 mm pour les *graupels*. La concentration en nombre des particules de grésil est plus grande pour les colonnes que pour les *graupels*. Cela peut expliquer le haut taux de grésil formé à la surface à partir des *graupels* en altitude. Le type de flocon de neige affecte également la taille des précipitations atteignant la surface car les particules liquides formées par une fonte complète sont plus petites que celles formées par une fonte partielle.

Les diamètres seuils entre les types de précipitations formés sont présentés dans la figure 4.10. On remarque en premier lieu que l'altitude où il y a une transition de types de précipitations varie considérablement selon le type de flocon de neige initial. La transition entre la neige mouillée et la neige presque complètement fondue s'effectue, respectivement, à 2.05 km, 1.70 km, 1.65 km, 1.55 km et 1.45 km lorsque des dendrites, de la *bulk-snow*, des *bullets*, des colonnes et *graupels* sont initialisés en haut de la couche d'air chaud. De plus, la transition entre la neige presque complètement fondue et la pluie s'effectue, respectivement, à 2 km, 1.6 km, 1.55 km, 0.6 km et 0.5 km pour les dendrites, les *bulk-snow*, les *bullets*, colonnes et *graupels*. En second lieu, le diamètre auquel la transition neige presque complètement fondue - pluie s'effectue dépend également du type de flocon de neige. Il est respectivement de 1.5 mm, 2 mm et 3 mm, 3 mm et 4 mm pour les dendrites, les *bulk-snow*, les

bullets, les colonnes et les *graupels*. À partir de ces diamètres, la neige presque complètement fondue fond complètement en pluie.

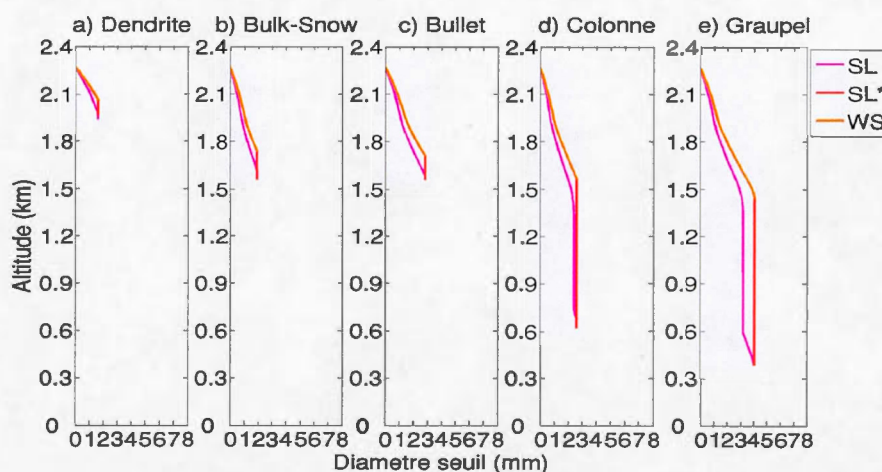


Figure 4.10 : L'évolution verticale des diamètres seuils simulés le 1^{er} février 1992 à Saint John's pour cinq types de flocons neige : a) dendrite, b) *bulk-snow*, c) *bullet*, d) colonne, e) *graupel*. WS est le seuil entre la neige et la neige mouillée, SL* est le diamètre maximum de la neige presque complètement fondue, seuil entre la neige mouillée et la neige presque complètement fondue et SL le seuil entre la de neige presque complètement fondue et la pluie.

4.2.2 Comparaison de types de précipitations à la surface

Une analyse détaillée de types de précipitations formés à la verticale a été réalisée dans la sous-section précédente. Dans cette sous-section, nous allons se concentrer sur les types de précipitation atteignant la surface. La figure 4.11 montre la fraction des types de précipitations à la surface associée aux profils de température et d'humidité observés à Saint John's, Terre-Neuve.

Lorsque des dendrites, *bulk-snow*, *bullets* sont initialisés, on note la présence à la surface uniquement de la pluie verglaçante. En revanche, les colonnes et les

graupels, produisent un mélange de grésil et de la pluie verglaçante à la surface. Seule la présence de *graupel* et colonne en altitude produisent un mélange de grésil et de pluie verglaçante à la surface. On constate que le taux de précipitation sous forme de pluie verglaçante est quatre fois plus grand que celui de grésil (80 % et 20 %, respectivement) lorsque les colonnes tombent à travers la couche d'air chaud,. Le taux de précipitation associé au grésil est le double de la pluie verglaçante (60 % et 38 %, respectivement) lorsque des *graupels* sont initialisés. Hanesiak et Stewart (1995) ont observé en altitude des grosses et denses particules qui correspondent aux *graupels* et aux colonnes. Étant donné que les observations à la surface ont rapporté un mélange de grésil et de pluie verglaçante, nos simulations sont en accord avec les observations.

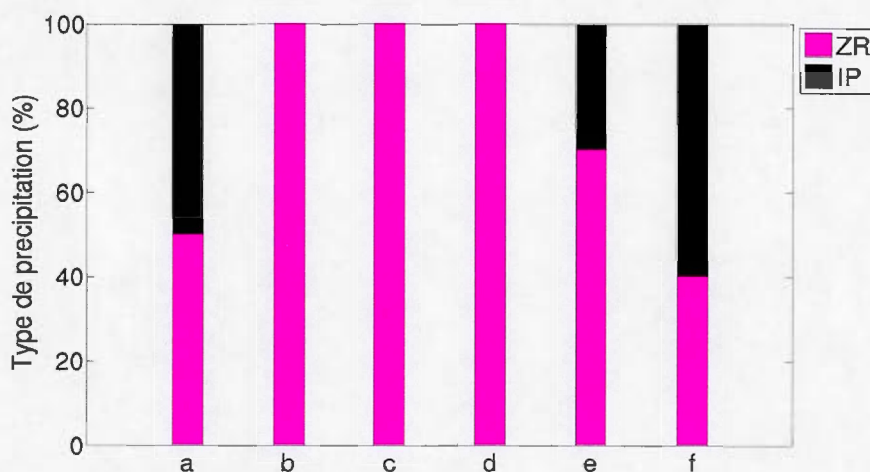


Figure 4.11 : Comparaison de types de précipitations à la surface observés et simulés en fonction des types initiaux de flocon de neige. Les types de précipitations sont normalisés par rapport au taux de précipitation. En a : l'observation, b : type de flocon dendrite, c : *bulk-snow*, d : *bullet*, e : colonne, f : *graupel*. Le modèle est initialisé avec les profils de température et d'humidité observés à Saint John's. Les symboles de la légende sont définis dans la liste des symboles.

Il faut noter que dans la version de notre modèle la formation locale de cristaux de glace par déposition n'est pas permise. Ceux-ci pourraient interagir avec les gouttes d'eau en surfusion pour former du grésil (Thériault et Stewart, 2010). C'est pour cette raison que les *bulk-snow* produisent uniquement de la pluie verglaçante en surface et non un mélange de grésil et de pluie verglaçante comme reporté par Thériault et Stewart (2010).

Ce chapitre nous a permis de comparer nos résultats numériques avec des observations disponibles. En premier lieu, les simulations sont en accord avec les observations. Les simulations faites avec les types de flocons observés, reproduisent bien les types de précipitations observées à différentes altitudes et à la surface. En second lieu, les incohérences existant entre les observations et certaines simulations peuvent être dues à plusieurs facteurs. Quelques processus microphysiques ont, entre autres, été négligés dans l'étude, et les schémas microphysiques comportent beaucoup de suppositions. Nous allons maintenant l'utiliser pour faire une étude théorique dont les résultats figurent dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V

PROFIL DE TEMPÉRATURE THÉORIQUE

Dans le chapitre précédent nous avons comparé nos résultats théoriques avec des observations disponibles. Ce chapitre présente une étude menée en utilisant des conditions atmosphériques idéalisées. Nous allons examiner la sensibilité des simulations initialisées par différents types de flocons de neige à la variation de l'épaisseur de la couche d'air chaud et froid ainsi que la température maximale et la température à la surface. Nous avons varié simultanément deux paramètres associés au profil vertical de température en plus du type du flocon de neige initial. Par exemple, une série de simulations initialisées avec cinq différents types de flocons dans lesquelles l'épaisseur de la couche d'air froid et la température de surface sont fixes. Ceci nous permet d'étudier simplement l'impact de la température maximale et l'épaisseur de la couche chaude sur le type de précipitation à la surface.

Pour déterminer le type de précipitation à la surface, nous allons exprimer l'accumulation de la précipitation en pourcentage. Ce pourcentage est le rapport entre le taux de précipitation de ce type au taux de précipitation total. Nous avons défini 5 catégories de précipitations qui sont données comme suit :

- Valeurs inférieures à 20 % inclusivement: seulement du grésil.

- Valeurs comprises entre 20 % et 40 % (40 % inclus): un mélange de grésil et de la pluie verglaçante avec comme prédominance de grésil.
- Valeurs comprises entre 40 % et 60 % (60 % inclus): un mélange de grésil et de pluie verglaçante à proportion égale.
- Valeurs comprises entre 60 % et 80 % (80 % inclus): un mélange de grésil et de pluie verglaçante avec comme prédominance la pluie verglaçante.
- Valeurs strictement supérieures à 80 % : seulement de la pluie verglaçante.

5.1 Sensibilité du type de précipitation à la température maximale et à l'épaisseur de la couche chaude

Les types de précipitations associées à une variation simultanée de l'épaisseur et de la température maximale de la couche chaude sont montrés sur la figure 5.1. L'épaisseur de la couche d'air froid est fixée à 700 m et la température de surface est de -6°C . Pour les simulations initialisées avec les dendrites (figure 5.1a), lorsque la température maximale de la couche d'air chaud est $< 1^{\circ}\text{C}$, il y a un mélange de grésil et de pluie verglaçante où le grésil est dominant, et ce, lorsque l'épaisseur de la couche chaude est < 400 m. Pour une épaisseur de la couche chaude > 400 m, il y a de la pluie verglaçante à la surface. Ainsi, pour une température maximale de la couche d'air chaud $> 1^{\circ}\text{C}$, les dendrites fondent complètement lors de leur passage dans la couche chaude, donc il se produit essentiellement de la pluie verglaçante à la surface pour toutes les épaisseurs de la couche d'air chaud simulées.

À une température $< 1^{\circ}\text{C}$, les *bulk-snow* (figure 5.1b) engendrent du grésil à la surface si l'épaisseur de la couche chaude est < 500 m et un mélange de grésil et de pluie verglaçante où le grésil est dominant si l'épaisseur de la couche d'air chaud est > 500 m. À cette température, la neige ne fond pas complètement en tombant à travers la couche d'air chaud. Si la température maximale de la couche d'air chaud est comprise entre 1°C et 2.5°C , il y a mélange de grésil et de pluie verglaçante qui

se forme lorsque l'épaisseur de la couche chaude est < 700 m, et la pluie verglaçante si l'épaisseur est > 700 m. Lorsque la température maximale de la couche d'air chaud est > 2.5 °C, les *bulk-snow* produisent de la pluie verglaçante à la surface pour toutes les épaisseurs car ils fondent complètement à cette température.

Les *bullets* (figure 5.1c) produisent du grésil à la surface si la température maximale de la couche chaude est < 1 °C car ils ne fondent pas complètement à cette température et regèlent graduellement en tombant dans la couche froide. Entre 1 °C et 3.5 °C, il se forme un mélange de pluie verglaçante et de grésil (avec prédominance du grésil) pour une épaisseur de la couche d'air chaud < 300 m et un mélange de pluie verglaçante et de grésil (avec prédominance de pluie verglaçante) pour une épaisseur > 600 m. Si l'épaisseur de la couche d'air chaud est comprise entre 300 et 600 m, il y a un mélange de grésil et de la pluie verglaçante à proportion égale. Si la température de la couche chaude est > 3.5 °C, les *bullets* produisent un mélange du grésil et de pluie verglaçante avec comme prédominance la pluie verglaçante si l'épaisseur de la couche chaude est < 200 m. Finalement à cette température, les *bullets* fondent complètement si l'épaisseur de la couche d'air chaud est > 200 m ce qui forme de la pluie verglaçante à la surface.

Les colonnes et *graupels* (figure 5.1d-e) produisent du grésil à la surface si température maximale de la couche chaude est < 1.5 °C, et ce, peu importe l'épaisseur de la couche d'air chaud car ils fondent que partiellement et regèlent graduellement en tombant dans la couche d'air froid. Si la température de la couche d'air chaud est > 1.5 °C, il s'agit d'un mélange de grésil et de pluie verglaçante qui se produit avec comme prédominance de la pluie verglaçante lorsque l'épaisseur de la couche d'air chaud est < 600 m pour les colonnes et < 700 m pour les *graupels*.

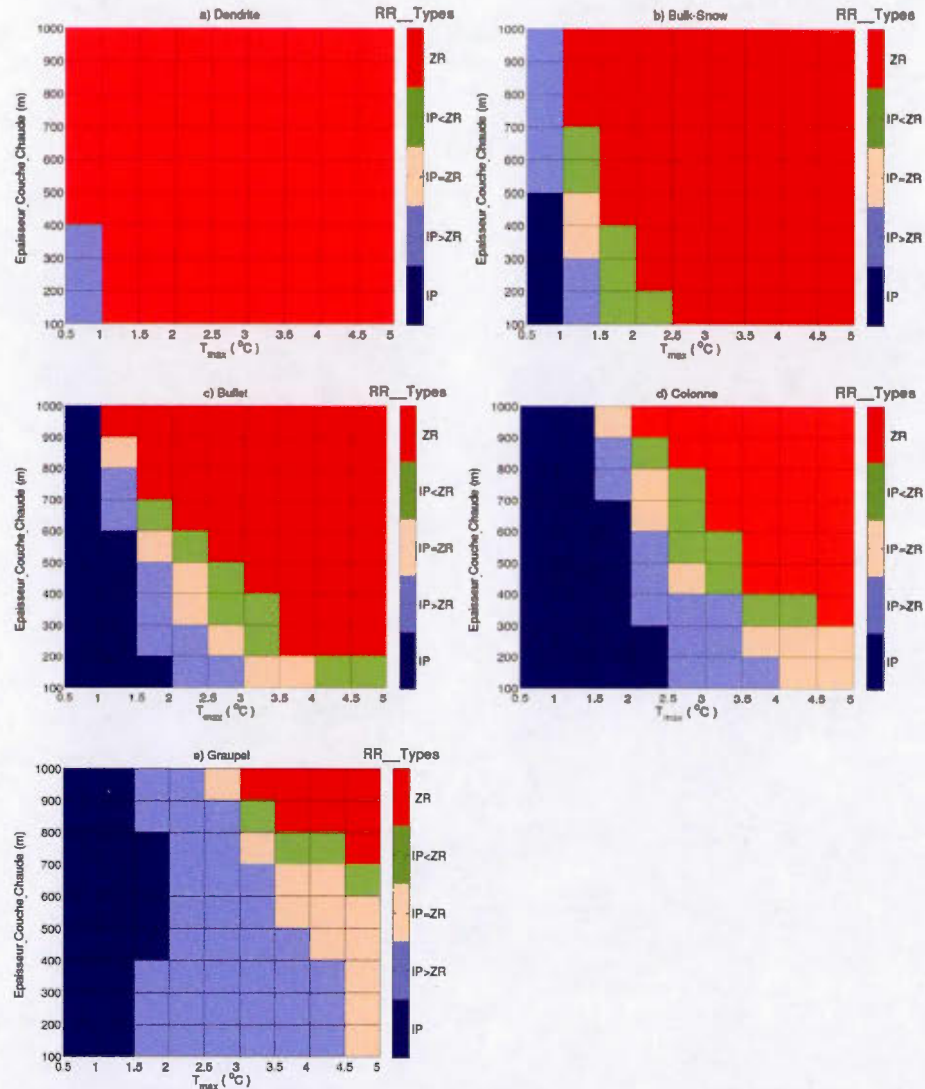


Figure 5.1 : Types de précipitations à la surface simulés en variant l'épaisseur et la température maximale de la couche chaude. Le type de flocon de neige initial est : (a) dendrite, (b) *bulk-snow*, (c) *bullet*, (d) colonne et (e) *graupel*. Chaque carré représente le type de précipitation pour un couplet d'intervalle température-épaisseur. La température de surface et l'épaisseur de la couche froide sont maintenues constantes respectivement à $-6^{\circ}C$ et à 700 m. Les symboles de la légende sont définis dans la liste des symboles.

En résumé, ces résultats montrent que le type de précipitation à la surface varie considérablement avec le type de flocon de neige initial en altitude car le taux de fonte de la neige varie non seulement en fonction des paramètres de la couche d'air chaud mais aussi du type initial de flocon de neige. Par exemple, les dendrites produisent de la pluie verglaçante en surface dans la gamme de température maximale de la couche d'air chaud $> 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. La pluie verglaçante est aussi produite lorsque la température maximale est $> 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $> 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les *bulk-snow* et *bullets*, respectivement, indépendamment de l'épaisseur de la couche d'air chaud. Ces gammes de température augmentent légèrement avec la diminution de l'épaisseur de la couche d'air froid car elle diminue le taux de regel.

5.2 Sensibilité à l'épaisseur de la couche chaude et la température de surface

Les types de précipitations à la surface associés à une variation simultanée de l'épaisseur de la couche chaude et de la température de surface sont présentés dans la figure 5.2. La température maximale de la couche chaude est de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et l'épaisseur de la couche froide est de 700 m.

Les dendrites (figure 5.2a) produisent un mélange de grésil et de pluie verglaçante lorsque l'épaisseur de la couche d'air chaud est $< 300\text{ m}$. Lorsque l'épaisseur de la couche d'air chaud est $> 300\text{ m}$, les dendrites fondent complètement à toutes les températures de surface, ce qui mène à la pluie verglaçante en surface.

Les *bulk-snow* (figure 5.2b) ne fondent que partiellement si l'épaisseur de la couche d'air chaud est $< 200\text{ m}$ et produisent du grésil à la surface. Une épaisseur de couche d'air chaud $> 900\text{ m}$ permet à la neige moyenne (*bulk-snow*) de fondre complètement pour former de la pluie verglaçante à la surface. Si l'épaisseur de la couche d'air

chaud est comprise entre 200 m et 700 m, il y a un mélange de grésil et de pluie verglaçante (avec plus de grésil) qui atteint la surface. En revanche, entre 700 m et 900 m, un mélange de grésil et de pluie verglaçante avec comme prédominance de la pluie verglaçante atteint la surface.

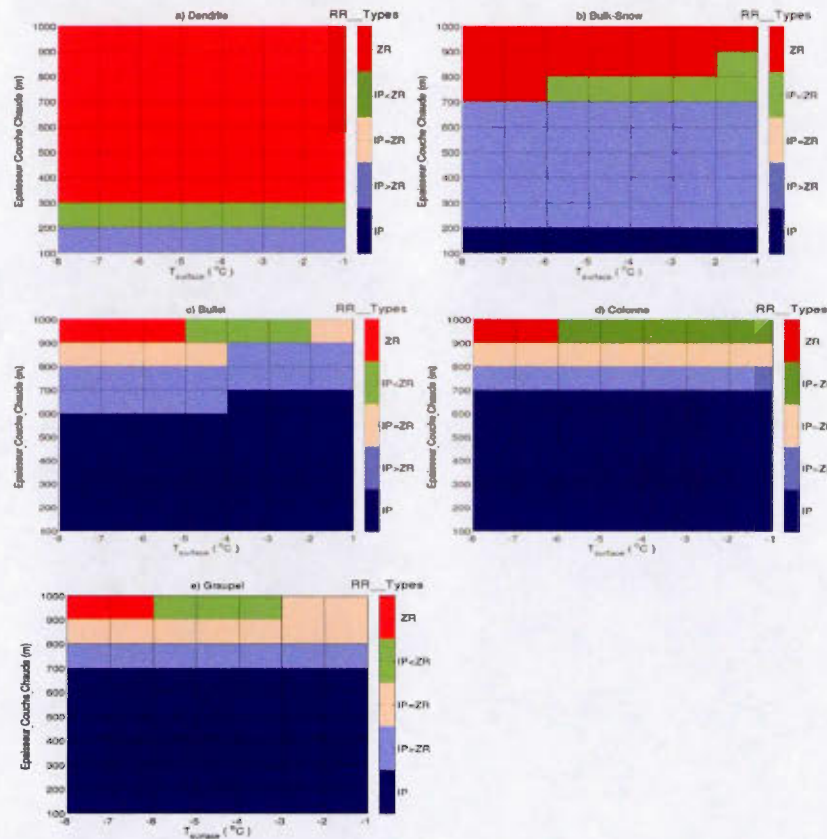


Figure 5.2: Types de précipitations à la surface associés à une variation de l'épaisseur de la couche chaude et la température en surface. Le type de flocon de neige initial est : (a) dendrite, (b) *bulk-snow*, (c) *bullet*, (d) colonne et (e) *graupel*. Chaque carré représente le type de précipitation pour un couplet d'intervalle température-épaisseur. La température maximale de la couche chaude et l'épaisseur de la couche froide sont maintenues constantes respectivement à 1 °C et à 700 m. Les symboles de la légende sont définis dans la liste des symboles.

Les *bullets*, les colonnes et les *graupels* (figure 5.2c, d et e) produisent tous du grésil à la surface lorsque l'épaisseur de la couche chaude est < 700 m car ces flocons ne fondent que partiellement à ces épaisseurs de la couche d'air chaud. Ceux-ci vont geler en tombant dans la couche d'air froid avant d'atteindre la surface. Ils donnent un mélange de grésil et de pluie verglaçante (avec prédominance de grésil), lorsque l'épaisseur de la couche d'air chaud est comprise entre 700 m et 900 m. Pour une épaisseur de la couche chaude > 900 m, il se produit de la pluie verglaçante à la surface si la température de surface est < -5 °C lorsque les *bullets* sont considérés et > -6 °C lorsque les colonnes et les *graupels* sont initialisés.

Ces résultats montrent que le type de précipitation à la surface varie peu avec la température de surface surtout pour les flocons moins denses (dendrites et *bulk-snow*). Le type initial du flocon de neige en altitude et l'épaisseur de la couche chaude conditionnent fortement le type de précipitation à la surface.

5.3 Sensibilité à l'épaisseur de la couche froide et à la température maximale

La figure 5.3 montre les types de précipitations à la surface associés à une variation simultanée de l'épaisseur de la couche d'air froid et de la température maximale de la couche d'air chaud pour différents types de flocons de neige. L'épaisseur de la couche d'air chaud est de 500 m et la température de surface est de -6 °C. Pour les dendrites (figure 5.3a), lorsque la température maximale est < 1 °C, il y a un mélange de grésil et de pluie verglaçante à la surface avec comme prédominance du grésil. Lorsque la température est > 1 °C, de la pluie verglaçante se forme, car les dendrites fondent complètement dans la couche chaude à cette température.

À une température de la couche d'air chaud < 1 °C, les *bulk-snow* (figure 5.3b) ne fondent que partiellement et produisent du grésil à la surface. Une température de la

couche chaude $> 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ permet aux *bulk-snow* de fondre complètement dans la couche chaude. Ceci mène à la formation de la pluie verglaçante à la surface peu importe l'épaisseur de la couche froide. Pour une température de la couche chaude comprise entre $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, il se forme un mélange de grésil et de pluie verglaçante avec comme prédominance la pluie verglaçante lorsque l'épaisseur de la couche froide est $< 800\text{ m}$, et avec comme prédominance du grésil lorsque l'épaisseur de la couche froide est $> 800\text{ m}$.

Les *bullets* (figure 5.3c) mènent à du grésil à la surface lorsque la température maximale est $< 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, car ils fondent que partiellement dans la couche chaude et regèlent en tombant dans la couche d'air chaud. À des températures maximales de la couche chaude $> 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, les *bullets* fondent complètement et produisent de la pluie verglaçante à la surface, et ce, pour toutes les épaisseurs de la couche d'air froid. Pour des températures maximales entre $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, un mélange de grésil et de la pluie verglaçante est obtenu à la surface.

Les colonnes (figure 5.3d) produisent du grésil, si température maximale de la couche chaude est $< 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et de la pluie verglaçante lorsque les températures sont $> 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ et ceci pour toutes les épaisseurs de la couche froide. Dans la gamme de températures entre $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, il y a un mélange de grésil et de pluie verglaçante avec comme prédominance la pluie verglaçante lorsque l'épaisseur de la couche froide est $< 300\text{ m}$ et avec comme prédominance de grésil si la couche froide est $> 300\text{ m}$. Lorsque les *graupels* sont initialisés (figure 5.3e), du grésil atteint la surface lorsque la température maximale est $< 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et l'épaisseur de la couche d'air froid est $> 400\text{ m}$. Il y a de la pluie verglaçante associée à une température maximale de la couche d'air chaud $> 4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une épaisseur de la couche froide $< 700\text{ m}$. Pour des températures de la couche d'air chaud entre $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, un mélange de grésil de pluie verglaçante qui arrive à la surface avec comme prédominance du grésil lorsque les

températures maximales sont $> 3^{\circ}\text{C}$. Ces gammes de température diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'air chaud.

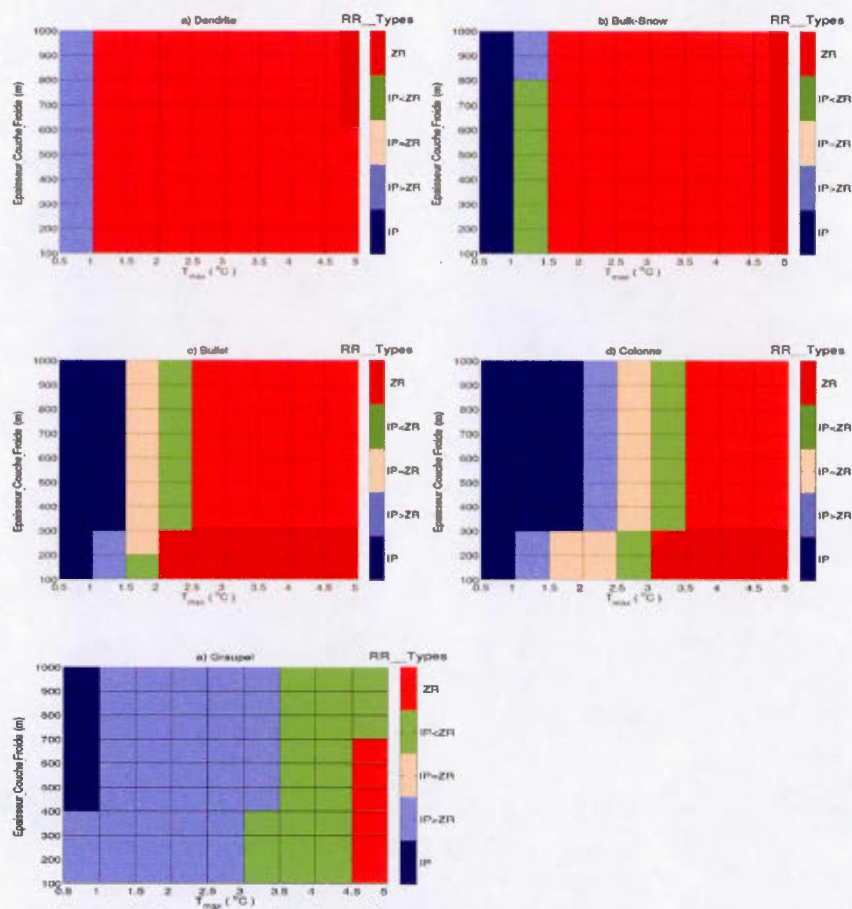


Figure 5.3 : Types de précipitations à la surface simulés en variant l'épaisseur de la couche froide et la température maximale de l'inversion. Le type de flocon de neige initial est: (a) dendrite, (b) *bulk-snow*, (c) *bullet*, (d) colonne et (e) *graupel*. Chaque carré représente le type de précipitation pour un couplet d'intervalle température-épaisseur. La température de surface et l'épaisseur de la couche chaude sont maintenues constantes respectivement à -6°C et à 500 m. Les symboles de la légende sont définis dans la liste des symboles.

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude de sensibilité des types de précipitations à la surface aux variations des paramètres atmosphériques tels que la température maximale et l'épaisseur de la couche chaude, l'épaisseur de la couche froide et la température de surface. Les types de précipitations atteignant la surface sont très sensibles à la variation du type de flocon de neige, à la température maximale et aux épaisseurs des couches chaude et froide. Toutefois, ils sont moins sensibles à la variation de la température de surface.

CHAPITRE VI

RESUMÉ ET CONCLUSIONS

6.1 Résumé

L'étude de l'impact de types de flocons de neige en altitude sur les précipitations à la surface a été faite à l'aide d'un modèle de nuage à une dimension couplé à un schéma microphysique (Thériault et Stewart, 2010). L'évolution verticale des types de précipitations formés en altitude et les types de précipitations à la surface ont été examinés. Le schéma microphysique original comportait un seul type de flocon de neige (type moyen) appelé «*bulk-snow*» dans cette étude. Le changement important opéré au schéma est la modification de certaines caractéristiques du flocon de neige en altitude (ex : les paramètres de forme). Quatre autres types de flocons neige (dendrites, *bullets*, colonnes et *graupels*) ont été testé et comparé au type de flocon initial (*bulk-snow*).

L'étude a été menée en trois étapes. Premièrement, nous avons examiné les caractéristiques des flocons de neige étudiés. Une comparaison de leur vitesse terminale en fonction du diamètre ainsi la vitesse terminale en fonction de la fraction liquide (degré de fonte) a été effectuée.

La vitesse de chute des flocons de neige utilisés dans cette étude varie de 0,5 m/s à 2,7 m/s. Parmi ces flocons de neige, les dendrites sont ceux qui tombent moins vite et les *graupels* tombent plus vite. Les résultats ont montré une forte augmentation de la vitesse terminale des flocons de neige au fur à mesure que la fraction liquide augmente. Lors du processus de fusion, la vitesse de chute des flocons de neige augmente au fur à mesure que l'accumulation d'eau augmente leur densité apparente.

Deuxièmement, nous avons simulé les profils verticaux de deux tempêtes hivernales en variant le type initial de flocon de neige. La première tempête est observée le 7 mars 2010 à Whistler, Colombie-Britannique (Gultepe et al., 2014; Thériault et al., 2014). Les profils initiaux de température et d'humidité sont ceux mesurés par la gondole le 7 mars 2010 à environ 23h UTC (Thériault et al., 2014).

L'analyse de la distribution de tailles initiale a montré que la concentration initiale est différente pour les flocons étudiés. Elle est plus grande pour les flocons moins denses (ex : dendrites). Pour des petits diamètres (< 1 mm) le type *bulk-snow* a une distribution de tailles semblable à celle des dendrites et pour des plus grands diamètres (> 3 mm) sa distribution est semblable à celle des *bullets* et colonnes. La différence dans la distribution de tailles initiale influence fortement le temps de fonte des flocons de neige en altitude.

L'évolution verticale des diamètres seuils a montré que le diamètre de transition entre la neige mouillée et la neige presque complètement fondue est respectivement de 1.5 mm, 1.8 mm et 2.5 mm pour les dendrites, les *bulk-snow* et les *bullets*. Cela est peut-être dû à la fonte rapide des flocons de neige les moins denses.

L'analyse de l'évolution verticale du contenu en masse des différents types de précipitations a montré, en premier lieu, que l'épaisseur et la hauteur de la ligne de transition pluie-neige varient selon le type de flocon de neige initial. Par exemple,

l'épaisseur de la ligne pluie-neige est de 87 m lorsque des dendrites tombent à travers l'atmosphère tandis que cette épaisseur est de 260 m et de 300 m respectivement lorsque les *bulk-snow* et les *bullets* sont initialisés. Les *graupels* et colonnes ne fondent pas complètement dans la couche d'air chaud. Cette différence est probablement expliquée par la différence de vitesse terminale des flocons de neige. Plus la vitesse de chute d'un flocon est élevée, moins il fond lorsqu'il tombe à travers la couche d'air chaud. En second lieu, l'analyse a montré que seule la pluie atteint la surface lorsque des dendrites et des *bulk-snow* sont initialisés, ce qui concorde avec les observations. Plus de 30 % des flocons observés étaient des dendrites et la pluie a été observée à la surface (Thériault et al., 2014).

La seconde tempête a été observée le 1^{er} février 1992 à Saint John's (Terre-Neuve) (Hanesiak et Stewart, 1995). Les profils initiaux de température et d'humidité sont ceux du radiosondage observés à Saint John's le 1 février 1992 à 2300 UTC. L'analyse de la distribution de tailles a montré que les dendrites, *bulk-snow* et *bullets* ont fondu complètement en pluie avant le niveau critique. En revanche, les colonnes et *graupels* ont fondu partiellement car un mélange de pluie et de neige presque complètement fondue a atteint le niveau critique. Ceci est dû à la fonte rapide des flocons de neige les moins denses.

L'analyse de l'évolution verticale du contenu en masse des différents types de précipitations a montré, en premier lieu, que l'épaisseur de la couche de mélange de neige presque complètement fondue et de la pluie est différente selon le type de flocon de neige initial. Par exemple, la fonte des dendrites produit une épaisseur de 300 m et les colonnes de 1300 m. Cela s'explique par la fonte complète et rapide des flocons moins denses dans la couche chaude. La fonte complète des flocons de neige denses nécessite une couche d'air plus chaud et plus épaisse comparé aux flocons moins denses. En second lieu, l'analyse a montré que les dendrites, *bulk-snow* et *bullets* ont produit seulement de la pluie verglaçante à la surface car seule la pluie qui

arrive au niveau critique. En revanche, les colonnes et *graupels* ont mené à un mélange de grésil et de la pluie verglaçante à la surface où un mélange de la pluie et la neige presque complètement fondue a atteint le niveau critique.

Les colonnes et *graupels* sont les seuls types de flocons de neige qui ont mené à un mélange de grésil et de pluie verglaçante à la surface. Ces résultats sont en accord avec les observations rapportées dans Hanesiak et Stewart (1995). Ils ont observés des flocons de neige denses qui correspondent aux types colonnes et *graupels* et les types de précipitations rapportées étaient de la pluie verglaçante et de du grésil.

Finalement, nous avons mené une étude théorique systématique. Dans ce cas, le modèle a été initialisé avec des profils verticaux de température et d'humidité idéaux et favorables à la formation du grésil et de la pluie verglaçante à la surface. Les paramètres principaux du profil vertical de température tels que l'épaisseur de la couche d'air chaud et froid, la température maximale de la couche d'air chaud et la température de surface ont été systématiquement variés. Les résultats ont montré que le type de précipitation à la surface est tributaire à l'épaisseur et à la température de la couche chaude mais surtout au type initial du flocon de neige en altitude. Par exemple, les dendrites, *bulk-snow* et les *bullets* produisent de la pluie verglaçante lorsque les températures maximales sont $> 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivement, sans conditions sur l'épaisseur de la couche d'air chaud. La production de pluie verglaçante à partir de colonnes et *graupels*, est conditionnée à une température maximale $> 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, et que l'épaisseur de la couche d'air chaud soit $> 400\text{ m}$ pour les colonnes et $> 700\text{ m}$ pour les *graupels*. Pour tous les flocons de neige, une variation de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ de la température maximale de la couche d'air chaud suffit pour changer le type de précipitation à la surface. Il faut une variation de 300 m de l'épaisseur de la couche d'air chaud pour engendrer un changement de type de précipitation en surface.

Les tests de sensibilité du type de précipitation à la surface par rapport à la variation de l'épaisseur de la couche d'air chaud et la température de surface ont montré, en premier lieu, que la température de surface affecte peu les types de précipitations à la surface quel en soit le type initial de flocon de neige. En second lieu, les résultats ont montré qu'une épaisse couche d'air chaud (> 500 m) est associée à la pluie verglaçante à la surface si le type de flocon initial est moins dense que la neige moyenne (*bulk-snow*). Un flocon de neige initial plus dense que la neige moyenne mènera à du grésil à la surface. La variation de l'épaisseur de la couche d'air froid affecte le type de précipitation à la surface si la température de la couche chaude est > 1 °C pour les flocons de neige denses (ex : colonnes, *graupels*). Les flocons denses fondent partiellement dans la couche d'air chaud ($T_w > 1$ °C) et regelent dans la couche d'air froid pour mener à la formation de grésil. Cela est dû à leur vitesse de chute assez élevée donc ces flocons passent moins de temps dans la couche d'air chaud et fondent moins.

6.2 Conclusions

Le but de cette étude était d'évaluer l'impact du type de flocon de neige en altitude sur le type de précipitation à la surface. À partir des simulations idéalisées, il a été démontré que les flocons de neige à faible vitesse terminale fondent plus vite dans la couche d'air chaud. Un flocon de neige à une vitesse de chute assez grande fond beaucoup plus près du sol qu'un flocon de neige qui tombe moins vite dans les mêmes conditions atmosphériques. La vitesse terminale des flocons augmente quand la fraction liquide augmente. Voici les conclusions principales de cette étude :

- Les résultats sont généralement en accord avec les observations. Par exemple, 30% des flocons observés étaient des dendrites et les simulations faites avec les dendrites reproduisent assez bien le type de précipitation observé à la surface.

- La ligne de transition pluie-neige est plus épaisse pour les flocons de neige plus denses. Les résultats ont montré que la présence des flocons moins denses que la neige moyenne en altitude est associée à la présence de la pluie ou de la pluie verglaçante à la surface. La présence de flocons de neige plus denses que la neige moyenne en altitude est associée à la présence d'un mélange de la pluie, de la neige presque complètement fondue et neige mouillée ou du grésil à la surface.
- Les tests de sensibilité ont montré que le type de précipitation atteignant la surface dépend de la température et l'épaisseur de la couche d'air chaud, mais surtout du type de flocon de neige.
- L'étude a montré que les dendrites, *bulk-snow* et *bullets* mènent à la de la pluie verglaçante à la surface lorsque les températures maximales sont $> 1^{\circ}\text{C}$, 1.5°C et 3.5°C , respectivement. En revanche, les colonnes et *graupels*, mènent à de la pluie verglaçante si les températures maximales sont $> 4^{\circ}\text{C}$ et que l'épaisseur de la couche d'air chaud $> 400\text{ m}$ pour les colonnes et $> 700\text{ m}$ pour les *graupels*.

Cette étude contribue à l'amélioration de notre compréhension des processus de formation menant à différents types de précipitation ainsi qu'à leur prévision. Bien que les résultats aient été concluants, quant à l'impact démontré, d'autres d'études sont nécessaires afin de rendre le modèle robuste. Premièrement, la connaissance de condition atmosphérique précurseur à la formation des types de flocons de neige est nécessaire. Par exemple, les dendrites se forment dans une gamme de température entre -12°C et -16°C alors que les *graupels* se forment dans une gamme de température entre -4°C et -10°C . En second lieu, plusieurs processus comme la sublimation, la condensation, la nucléation sont négligés dans cette étude. Afin de considérer ces processus nous avons utilisé la température du thermomètre mouillé et avons supposé des conditions atmosphériques saturées par rapport à l'eau liquide. Une étude incluant ces processus ainsi que le taux refroidissement / réchauffement dû à la fonte / regel nous permettrait d'étudier la distribution de chaleur causée par les

changements de phase et de mener une étude idéalisée sur l'impact de l'advection de température horizontale sur l'évolution des différents types de précipitations. En troisième lieu, les schémas «bulk» calculent le taux de fonte approximative ce qui conduit à une surestimation du taux de précipitation recongelée atteignant la surface (Geresdi et al. 2014). Une étude similaire avec un schéma « bin », bien que coûteux, pourrait être menée pour pallier cette situation. L'impact du type de flocons de neige sur les conditions météorologiques associées au passage d'un front chaud pourrait être étudié. Le type de flocons peut être un facteur important lorsque les températures sont autour de 0 °C.

Finalement, la compréhension de la physique et les mécanismes affectant la formation des types précipitations hivernales est une question importante. Actuellement les schémas microphysiques utilisés pour la prévision des types de précipitations considèrent un seul type de flocon de neige. Ce mémoire a répondu à la question quant à l'impact du type flocons sur les types de précipitations à la surface. Par conséquent l'utilisation de plus de types de flocons dans le paramétrage microphysique pourrait améliorer la prévision de type de précipitation lorsque les températures sont autour de 0 °C.

ANNEXE A

DESCRIPTION DES OBSERVATIONS

A.1 La campagne de mesure expérience SNOW-V10

Cette campagne avait pour objectif d'améliorer notre compréhension et notre capacité à faire la prévision immédiate de la quantité et du type de précipitation (Isaac et al. 2012). La campagne s'est déroulée entre le 12 février et 21 mars 2010 à Whistler en Colombie-Britannique (figure A.2). Cette campagne fut une occasion pour les scientifiques de développer des meilleures techniques de prévision du temps et d'étude du climat en terrain complexes (Thériault et al., 2012). Elle a permis la comparaison directe des résultats des modèles numériques aux observations (Joe et al., 2010). En plus de plusieurs stations météorologiques installées dans la région, l'observation du type de précipitation le long de la montagne qui était un apport considérable. L'observation du type de précipitation a permis l'amélioration de notre compréhension des modes l'évolution et la formation des types de précipitation le long de la montagne. La transition de pluie-neige est fréquemment observée le long de la montagne de Whistler du faite que la température est proche de 0 °C. La présence d'une couche d'air chaud aux bas niveaux conduit la neige à la fonte donc à la formation d'une zone de transition pluie-neige (Thériault et al., 2012).

Des mesures météorologiques et des macro et micro-photographies ont été récoltées le long de la montagne. La mesure de la taille des cristaux de neige et leur macrophotographie ont été effectuées à la station RND située au sommet de la montagne. Les observations visuelles des types de précipitations et une variété de profils de température et d'humidité ont été recueillies entre la station RND (Roundhouse station) située au sommet de la montagne (2000 m environ) et le village Whistler (658 m) (figure A.1a). La présente étude utilise uniquement les observations recueillies le 7 mars 2010. Les profils de température et d'humidité choisis sont ceux de la gondole dont la trajectoire est illustrée par la figure A.1b. Ce jour est caractérisé par une tempête avec la présence d'une ligne de transition pluie-neige très nette. On notait la présence d'un creux profond dans la région le 7 mars 2010. L'intensité et la trajectoire du système synoptique peuvent être en partie responsables de la variabilité du type de précipitation. Le détail sur les interactions entre l'échelle synoptique et locale dans la région est donné dans Thériault et al. (2012).

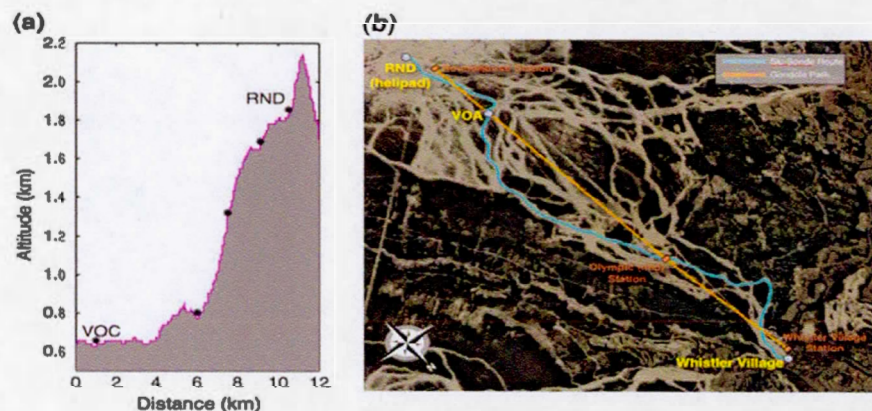


Figure A.1 : (a) L'emplacement des différentes stations météorologiques le long de la montagne de Whistler et leurs altitudes au-dessus du niveau de la mer, les sondages y compris la gondole ont été lancés à partir du point VOC au niveau du village de Whistler. (b) les profils manuels de la gondole et de ski le long de la montagne, le

point RND (Roundhouse station) est le sommet de la montagne où les observations de type de flocon ont été effectuées (Thériault et al., 2014).

A.2 Les observations de CASP II

Cette campagne a été menée près de Saint John's Terre-Neuve (figure A.2) de janvier à mars 1992, elle se focalisait sur la nature des sévères tempêtes maritimes. CASP II fut l'une des premières campagnes de mesure à son époque à bénéficier des mesures d'aéronefs et de surface. Elle a permis de déterminer les types de flocons se produisant dans les tempêtes (Lawson et Stewart, 1997). Plusieurs instruments sophistiqués ont été utilisés (Crawford et Medej, 1992; Donaldson et al., 1993; Lawson et Stewart, 1997). La présente étude utilise uniquement les données du 1^{er} au 2 février 1992. Ce jour est caractérisé par une longue période de grésil, qui s'explique par une configuration assez particulière des profils de température et d'humidité. Entre le 31 janvier et 1^{er} février une tempête s'est produite sur toute la région atlantique du Canada. Un système de front occlus situé au Nord le long de la côte Est intercepte un front stationnaire aligné le long de la côte atlantique produisant un front chaud dans la péninsule d'Avalon. La présence d'une couche d'air chaud ($T_w > 0\text{ °C}$) et sous saturée par rapport à l'eau en altitude et d'une couche d'air froid ($T_w < 0\text{ °C}$) près de la surface favorise la formation du grésil. La sous-saturation de la couche chaude réduit le taux de fonte de la neige en altitude et la couche froide est assez importante pour que les particules fondues regèlent complètement (Hanesiak et Stewart, 1995). L'hypothèse est qu'en plus de cette configuration le type initial des flocons de neige peut jouer un rôle prépondérant dans la formation du grésil en surface. La simulation a été faite avec le modèle à une dimension initialisé avec le sondage du 1^{er} février 1992 à 23 h (15 UTC) et les résultats sont comparés aux données d'observation de surface et d'aéronefs de la campagne CASP II.

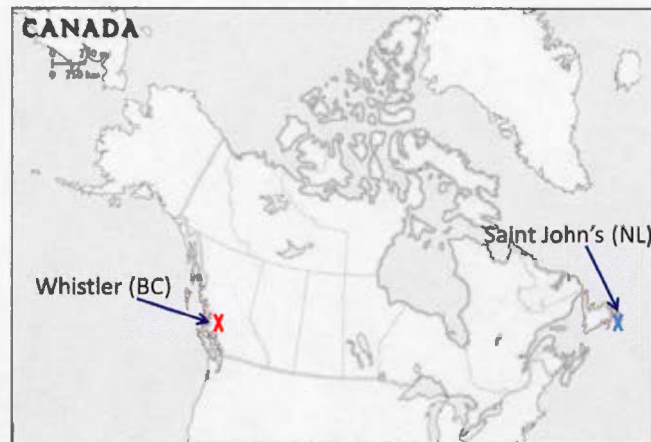


Figure A.2 : L'emplacement des différentes stations météorologiques dont les profils verticaux de température et d'humidité sont utilisées pour les simulations. Les croix rouge et bleu indiquent l'emplacement de Whistler et Saint John's respectivement.

RÉFÉRENCES

- Baldwin, M., Treadon, R., & Contorno, S. (1994). *Precipitation type prediction using a decision tree approach with NMCs mesoscale eta model*. Paper presented at the Preprints, 10th Conf. on Numerical Weather Prediction, Portland, OR, Amer. Meteor. Soc.
- Bashkirova, T. A., & Pershina, T. A. (1964). On the mass of snow crystals and their fall velocity. *Proc. Main Geophys. Obs.*, 165, 83–100.
- Berry, E. X., & Reinhardt, R. L. (1974). An analysis of cloud drop growth by collection Part II. Single initial distributions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(7), 1825–1831.
- Bigg, E. K. (1953). The supercooling of water. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 66(8), 688.
- Bocchieri, J. R. (1980). The objective use of upper air soundings to specify precipitation type. *Monthly Weather Review*, 108(5), 596–603.
- Bourgouin, P. (2000). A method to determine precipitation types. *Weather and Forecasting*, 15(5), 583–592.
- Brandes, E. A., Ikeda, K., Zhang, G., Schönhuber, M., & Rasmussen, R. M. (2007). A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(5), 634–650.
- Cantin, A., & Bachand, D. (1990). *Synoptic pattern recognition and partial thickness techniques as a tool for precipitation type forecasting associated with a winter storm*. Preprints. Paper presented at the Third Workshop. Operational Meteorology.

- Cheng, C., Auld, H., Li, G., Klaassen, J., & Li, Q. (2007). Possible impacts of climate change on freezing rain in south-central Canada using downscaled future climate scenarios. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(1), 71-87.
- Cortinas Jr, J. V., Bernstein, B. C., Robbins, C. C., & Walter Strapp, J. (2004). An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976-90. *Weather and forecasting*, 19(2), 377-390.
- Czys, R. R., Scott, R. W., Tang, K. C., Prybylinski, R. W., & Sabones, M. E. (1996). A physically based, non-dimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets. *Weather Forecast*, 11, 591– 598.
- Derouin, R. (1973). Experimental forecast of freezing level (s), conditional precipitation type, surface temperature, and 50-meter wind, produced by the planetary boundary layer (PBL) model. *NOAA-NWS Tech. Procedures Bull*, 101(8).
- Dorais, J. G. (2010). Évaluation de la performance de quatre schémas microphysique pour la simulation des nuages arctiques en phase mixte avec le modèle Gem-Lam.
- Frick, C., Seifert, A., & Wernli, H. (2013). A bulk parametrization of melting snowflakes with explicit liquid water fraction for the COSMO model. *Geoscientific Model Development*, 6(6), 1925-1939.
- Geresdi, I. (1998). Idealized simulation of the Colorado hailstorm case: Comparison of bulk and detailed microphysics. *Atmospheric research*, 45(4), 237-252.
- Geresdi, I., Sarkadi, N., & Thompson, G. (2014). Effect of the accretion by water drops on the melting of snowflakes. *Atmospheric research*, 149, 96-110.
- Glickman, T. S. (2000). Glossary of Meteorology, 2nd ed. *Am. Meteorol. Soc., Boston, Mass.*
- Gultepe, I., Isaac, G., Joe, P., Kucera, P., Thériault, J., & Fisico, T. (2014). Roundhouse (RND) mountain top research site: measurements and uncertainties for winter alpine weather conditions. *Pure and Applied Geophysics*, 171(1-2), 59-85.
- Hanesch, M. (1999). Fall velocity and shape of snowflakes. *Ph.D. thesis. Diss. ETH No. 13322. 111 pp.*
- Hanesiak, J. M., & Stewart, R. E. (1995). The mesoscale and microscale structure of a severe ice pellet storm. *Monthly weather review*, 123(11), 3144-3162.

- Hanesiak, J. M., Stewart, R. E., Szeto, K. K., Hudak, D. R., & Leighton, H. G. (1997). The structure, water budget, and radiational features of a high-latitude warm front. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(12), 1553-1573.
- Harrington, J. Y., Meyers, M. P., Walko, R. L., & Cotton, W. R. (1995). Parameterization of ice crystal conversion processes due to vapor deposition for mesoscale models using double-moment basis functions. Part I: Basic formulation and parcel model results. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(23), 4344-4366.
- Henson, W., Stewart, R., & Kochtubajda, B. (2007). On the precipitation and related features of the 1998 Ice Storm in the Montréal area. *Atmospheric research*, 83(1), 36-54.
- Heymsfield, A. J., & Platt, C. (1984). A parameterization of the particle size spectrum of ice clouds in terms of the ambient temperature and the ice water content. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(5), 846-855.
- Isaac, G. A., Joe, P., Mailhot, J., Bailey, M., Bélair, S., Boudala, F., . . . Crawford, R. (2014). Science of nowcasting olympic weather for Vancouver 2010 (SNOW-V10): a world weather research programme project. *Pure and Applied Geophysics*, 171(1-2), 1-24.
- Jiusto, J. E., & Bosworth, G. E. (1971). Fall velocity of snowflakes. *Journal of Applied Meteorology*, 10(6), 1352-1354.
- Kessler, E. (1969). On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation. *American Meteorological Society*, no. 32,, 84.
- Kobayashi, T. (1961). The growth of ice crystals at low supersaturations. *Philosophical magazine*, 6, 1363-1370.
- Kong, F., & Yau, M. (1997). An explicit approach to microphysics in MC2. *Atmosphere Ocean*, 35(3), 257-291.
- Lawson, R. P., Stewart, R. E., & Angus, L. J. (1998). Observations and numerical simulations of the origin and development of very large snowflakes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 55(21), 3209-3229.
- Lin, Y.-L., Farley, R. D., & Orville, H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6), 1065-1092.

- Locatelli, J. D., & Hobbs, P. V. (1974). Fall speeds and masses of solid precipitation particles. *Journal of Geophysical Research*, 79(15), 2185-2197.
- Marshall, J. S., & Langleben, M. P. (1954). A theory of snow-crystal habit and growth. *Journal of Meteorology*, 11(2), 104-120.
- Matsuo, T., & Sasyo, Y. (1981). Empirical formula for the melting rate of snowflakes. *j. meteor. soc. Japn*, 59, 10-25.
- Meyers, M. P., Walko, R. L., Harrington, J. Y., & Cotton, W. R. (1997). New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. *Atmospheric research*, 45(1), 3-39.
- Milbrandt, J. A., & Yau, M. (2005a). A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(9), 3051-3064.
- Milbrandt, J. A., & Yau, M. (2005b). A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(9), 3065-3081.
- Milbrandt, J. A., & Morrison, H. (2013). Prediction of graupel density in a bulk microphysics scheme. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(2), 410-429.
- Mitra, S., Vohl, O., Ahr, M., & Pruppacher, H. (1990). A wind tunnel and theoretical study of the melting behavior of atmospheric ice particles. IV: Experiment and theory for snow flakes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(5), 584-591.
- Morrison, H., & Grabowski, W. W. (2007). Comparison of bulk and bin warm-rain microphysics models using a kinematic framework. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(8), 2839-2861.
- Ramer, J., 1993:. (1993). An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output. Preprints, Fifth Int. Conf. on Aviation. *Weather Systems, Vienna, VA, Amer. Meteor. Soc.*, 227-230.
- Rasmussen, R. M., Vivekanandan, J., Cole, J., Myers, B., & Masters, C. (1999). The estimation of snowfall rate using visibility. *Journal of Applied Meteorology*, 38(10), 1542-1563.
- Regan, M. (1998). Canadian ice storm 1998. *WMO Bull.*(47), 250–256.

- Ressler, G. M., Milrad, S. M., Atallah, E. H., & Gyakum, J. R. (2012). Synoptic-scale analysis of freezing rain events in Montreal, Quebec, Canada. *Weather and forecasting*, 27(2), 362-378.
- Robbins, C. C., & Cortinas, J. J. V. (2002). Local and synoptic environments associated with freezing rain in the contiguous United States. *Weather and forecasting*, 17(1), 47-65.
- Rutledge, S. A., & Hobbs, P. (1983). The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the "seeder-feeder" process in warm-frontal rainbands. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(5), 1185-1206.
- Schoenberg Ferrier, B. (1994). A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(2), 249-280.
- Sekhon, R., & Srivastava, R. (1970). Snow size spectra and radar reflectivity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 27(2), 299-307.
- Statistics-Canada. (1998). The St. Lawrence River Valley 1998 ice storm: Maps and facts. *Statistics Canada, Rep. 16F0021XIB1998001*, 17 pp.
- Stewart, R., Crawford, R., & Donaldson, N. (1990). Precipitation characteristics within several Canadian East Coast winter storms. *Atmospheric research*, 25(4), 293-316.
- Stewart, R., Crawford, R., Donaldson, N., Low, T., & Sheppard, B. (1990). Precipitation and environmental conditions during accretion in Canadian east coast winter storms. *Journal of Applied Meteorology*, 29(7), 525-538.
- Stewart, R. E. (1992). Precipitation types in the transition region of winter storms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(3), 287-296.
- Stewart, R. E., & King, P. (1987). Freezing precipitation in winter storms. *Monthly weather review*, 115(7), 1270-1280.
- Stewart, R. E., Marwitz, J. D., Pace, J. C., & Carbone, R. E. (1984). Characteristics through the melting layer of stratiform clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(22), 3227-3237.

- Stewart, R. E., Yiu, D. T., Chung, K. K., Hudak, D. R., Lozowski, E. P., Oleskiw, M., Szeto, K. K. (1995). Weather conditions associated with the passage of precipitation type transition regions over Eastern Newfoundland. *Atmosphere-Ocean*, 33(1), 25-53.
- Sulia, K. J., Harrington, J. Y., & Morrison, H. (2013). A Method for Adaptive Habit Prediction in Bulk Microphysical Models. Part III: Applications and Studies within a Two-Dimensional Kinematic Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(10), 3302-3320.
- Sundqvist, H. (1978). A parameterization scheme for non-convective condensation including prediction of cloud water content. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 104(441), 677-690.
- Szeto, K., Tremblay, A., Guan, H., Hudak, D., Stewart, R., & Cao, Z. (1999). The mesoscale dynamics of freezing rain storms over eastern Canada. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(10), 1261-1281.
- Szyrmer, W., & Zawadzki, I. (1999). Modeling of the melting layer. Part I: Dynamics and microphysics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(20), 3573-3592.
- Thériault, J. M., Stewart, R., Milbrandt, J., & Yau, M. (2006). On the simulation of winter precipitation types. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 111(D18).
- Thériault, J. M., Rasmussen, K. L., Fisico, Teresa, Stewart, R. E., Joe, P., Gultepe, I., Clément, M., & Isaac, G. A. (2014). Weather observations on Whistler Mountain during five storms. *Pure and Applied Geophysics*, 171(1-2), 129-155.
- Thériault, J. M., Rasmussen, R., Ikeda, K., & Landolt, S. (2012). Dependence of snow gauge collection efficiency on snowflake characteristics. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(4), 745-762.
- Thériault, J. M., Rasmussen, R., Smith, T., Mo, R., Milbrandt, J. A., Brugman, M. M., Denis, B. (2012). A case study of processes impacting precipitation phase and intensity during the Vancouver 2010 Winter Olympics. *Weather and forecasting*, 27(6), 1301-1325.
- Thériault, J. M., & Stewart, R. (2007). On the effects of vertical air velocity on winter precipitation types. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(2), 231-242.

- Thériault, J. M., & Stewart, R. E. (2010). A parameterization of the microphysical processes forming many types of winter precipitation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(5), 1492-1508.
- Thériault, J. M., Stewart, R. E., & Henson, W. (2010). On the dependence of winter precipitation types on temperature, precipitation rate, and associated features. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(7), 1429-1442.
- Thériault, J. M., Stewart, R. E., & Henson, W. (2012). Impacts of terminal velocity on the trajectory of winter precipitation types. *Atmospheric research*, 116, 116-129.
- Wagner, A. J. (1957). *Mean temperature from 1000 mb to 500 mb as a predictor of precipitation type*: MIT Department of Meteorology.
- Walko, R. L., Cotton, W. R., Meyers, M., & Harrington, J. (1995). New RAMS cloud microphysics parameterization Part I: the single-moment scheme. *Atmospheric research*, 38(1), 29-62.
- Wisner, C., Orville, H., & Myers, C. (1972). A numerical model of a hail-bearing cloud. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29(6), 1160-1181.
- Woods, C. P., Stoelinga, M. T., & Locatelli, J. D. (2007). The IMPROVE-1 Storm of 1-2 February 2001. Part III: Sensitivity of a mesoscale model simulation to the representation of snow particle types and testing of a bulk microphysical scheme with snow habit prediction. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(11), 3927-3948.
- Zerr, R. J. (1997). Freezing rain: An observational and theoretical study. *Journal of Applied Meteorology*, 36(12), 1647-1661.
- Ziegler, C. L. (1985). Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part 1: Model development and preliminary testing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 42(14), 1487-1509.